Sanierung von drei kleinen Wohngebäuden in Hofheim



Teilprojekt

Großelement-Dämmtechnik mit Vakuumdämmung

Fördermittelgeber des Forschungsprojekts:

Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie
(über den Projektträger Jülich, PTJ)
und
Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung

Förderkennzeichen 0329750V

Endbericht, Darmstadt, November 2007

Anschriften der Autoren

HWB Dipl.-Ing. Josef Mayr

Hofheimer Wohnungsbau GmbH
Elisabethstr. 3a
67519 Hofheim

IFT Dipl.-Ing. Ingo Leuschner

Institut für Fenstertechnik e. V.
Theodor-Gietl-Straße 7-9
83026 Rosenheim

IGRT Prof. Dr.-Ing. habil. Eckhard Reyer
Dipl.-Ing. Rainer Kröger
Dipl.-Ing. Cécile Bamberger

Ingenieurgesellschaft für Bautechnik mbH
Reyer • Gathmann + Teilhaber
Universitätsstraße 74
D-44789 Bochum

IWU Dipl.-Ing. Marc Großklos
Dr.-Ing. Nikolaus Diefenbach
Dipl.-Soz. Günter Lohmann

Institut Wohnen und Umwelt GmbH
Annastraße 15
64285 Darmstadt

P**DREI** Dipl.-Ing. Architekt Stefan Reuther
Dipl.-Ing. Architekt Christian Weber

planungsgruppeDREI - Reuther, Stärz, Dreibholz
Architekten und Ingenieure – Partnerschaft
Ober-Ramstädter Str. 96 E
64367 Mühltal

VARIOTEC Dipl.-Ing. Christof Stölzel
Dipl.-Ing. Holger Thoms

Sandwichelemente GmbH & Co KG
Weißmarterstraße 3 – 5
92318 Neumarkt i. d. Opf.

IWU-Bestellnummer: 02/07

ISBN 9-783932-074950



Institut Wohnen und Umwelt GmbH
Annastraße 15
64285 Darmstadt
Tel. 06151 - 2904-0

Email: info@iwu.de
Internet: www.iwu.de

Inhalt

1 Einleitung

Die Hofheimer Wohnungsbau GmbH führte in den Jahren 2005/2006 umfangreiche Modernisierungsmaßnahmen an drei kleinen fast baugleichen Mehrfamilienhäusern in der Wilhelmstraße in Hofheim am Taunus durch.
Dieses Vorhaben wurde durch ein umfangreiches, gegenwärtig noch laufendes Forschungsprojekt begleitet, das vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie über den Projektträger Jülich (PTJ) und vom Hessischen Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung gefördert und vom Institut Wohnen und Umwelt, Darmstadt, koordiniert wird. Weitere Partner sind neben dem Bauherrn die PlanungsgruppeDrei, Nieder-Ramstadt, das Ingenieurbüro Gathmann Reyer und Teilhaber, Bochum, die Variotec Sandwichelemente GmbH, Neumarkt, das Institut für Fenstertechnik, Rosenheim und das Ingenieurbüro Energie & Haus, Darmstadt. Die folgende Abbildung gibt einen Überblick über das Projektteam und die Aufgabenverteilung.



Planungsgruppe Drei PartG

- Architektur
- Gebäudetechnik
- Integration GEDT in energetische Modernisierung
- Leitung Teilprojekt GEDT



Hofheim Wohnungsbau GmbH

- Bauherr



Ingenieurbüro Gathmann, Reyer u. Teilhaber GmbH

- Entwicklung Großelementdämmtechnik GEDT
- Konstruktion und Statik



Ingenieurbüro Energie- und Haus

- Baubegleitende Qualitäts-sicherung
- Auswertung Baukosten, Wirtschaftlichkeit



Institut Wohnen und Umwelt GmbH

- Projektkoordination
- energetische Optimierung GEDT-Elemente
- Messprogramm
- Mieterbefragung
- energetische Optimierung des Gesamtprojekts
- ökonomische Bewertung des Gesamtprojekts



Variotec-Sandwichelemente GmbH & Co. KG.

- Herstellung und Installation der GEDT-Elemente



ift Rosenheim gGmbH

- Integration Fenster in GEDT
- Schallmessungen

Abbildung 1-1: Projektpartner des Forschungsvorhabens

Das Forschungsvorhaben insgesamt wird vor allem durch zwei inhaltliche Schwerpunkte bestimmt:

- Es wurde ein neues Konzept für den Fassaden-Wärmeschutz durch großformatige, vorgefertigte Dämmelemente (Großelement-Dämmtechnik – GEDT) in Verbindung mit Vakuumisolationspaneelen (VIP) entwickelt und angewendet.
- An den drei Gebäuden wurden unterschiedlich weitgehende Energiesparmaßnahmen realisiert. Dies sind der Neubaustandard nach Energieeinsparverordnung sowie der Energiesparhaus-60- und Energiesparhaus-40-Standard gemäß den von der Förderbank KfW bei der Neubauförderung angewendeten Definitionen. Da es sich um drei fast baugleiche Gebäude handelt, lässt sich ein direkter Vergleich der energetischen Qualitätsniveaus durchführen.

Im Folgenden wird ein kurzer Überblick über die Gebäude im Ursprungszustand sowie die durchgeführten Modernisierungsmaßnahmen gegeben.

Die drei freistehenden Gebäude in der Wilhelmstraße in Hofheim am Taunus wurden 1927 baugleich in doppelschaliger Massivbauweise erstellt und sind voll unterkellert. Die Erschließung erfolgt über ein zentrales Treppenhaus auf der Westseite. Erdgeschoss und Obergeschoss sind als Wohnungen mit jeweils ca. 77 m² Nettogrundfläche ausgebildet. Der Dachraum war teilweise als beheizter Wohnraum sowie als Abstellfläche und Trockenboden genutzt. Das Dach war als Walmdach in Holzkonstruktion mit Biberschwanzdeckung ausgebildet. Anfang der 1980er Jahre wurden die Häuser ein erstes Mal saniert. Ihre Fassaden wurden im Erd- und Obergeschoss mit einem Wärmedämmverbundsystem (WDVS) aus 4 cm dickem Polystyrol versehen, die alten Holzfenster wurden durch Kunststofffenster ersetzt.



Abbildung 1-2: Die drei Gebäude vor der Modernisierung

Im Zuge der jetzt durchgeführten Modernisierung wurden, jeweils abhängig vom angestrebten Energiesparstandard, folgende Maßnahmen durchgeführt:

- Außenwände (WDVS) 8 – 24 cm Dämmung (inkl. 4 cm vorhandenes WDVS)
- Außenwände straßenseitig: GEDT mit Vakuumdämmung (nach Entfernung des vorhandenen WDVS)
- Neue Dächer, 18 – 30 cm Dämmung
- Kellerdecken: 4 – 6 cm Dämmung
- 2-Scheiben-Wärmeschutzverglasung (GEDT: 3-Scheiben-Passivhausfenster)
- Nahwärmeversorgung über Holzpelletkessel (Heizzentrale in einem der Gebäudekeller)

- Energiesparhaus 40 (ESH 40): Lüftungsanlage mit Wärmerückgewinnung
- Energiesparhaus 60 (ESH 60): Abluftanlage

Der vorliegende Bericht behandelt das Teilprojekt Großelement-Dämmtechnik (GEDT) mit Vakuumdämmung. Die weiteren Aspekte des Modernisierungsvorhabens werden in einem separaten Bericht dargestellt. Die baulichen Maßnahmen an den Gebäuden sind inzwischen abgeschlossen. Das Forschungsprojekt, das u. a. ein ausführliches Messprogramm über zwei Heizperioden beinhaltet, läuft bis zum Frühjahr 2008.

2 Konzept und Planung

2.1 Aufgabenstellung

Die Straßenfassaden der drei Gebäude boten durch die Grenzbebauung zum Gehsteig wenig Raum für eine Wärmedämmung. Durch den Einsatz von Vakuumdämmelementen verbunden mit der Großelement-Dämmtechnik (kurz: GEDT), sollten die angestrebten energetischen Kennwerte bei möglichst kleiner Dämmstoffdicke erreicht werden. Gleichzeitig war es das Ziel, durch Vorfertigung kurze Montagezeiten mit wenigen Nacharbeiten auf der Baustelle zu realisieren. Bei der Entwicklung und Planung der GEDT-Elemente konnte teilweise auf Erfahrungen aus einem abgeschlossenen Forschungsprojekt zurückgegriffen werden, allerdings mit herkömmlichen Dämmstoffen bei statisch ansetzbarem Sandwich-Tragverhalten der GEDT-Elemente insgesamt. Themen, die sich für das Modernisierungsprojekt in Hofheim – u. a. aufgrund des Einsatzes von Vakuumdämmplatten (Vakuum-Isolations-Paneelen, kurz: VIP) - neu stellten, sind:

- Integration der Vakuumdämmplatten in die GEDT-Elemente.
- Integration von Fenstern in die GEDT-Elemente bereits in der Vorfertigung. Um Fenster bereits in der Vorfertigung in die GEDT-Elemente integrieren zu können, mussten Fragen der Statik, Bauphysik und Montage sowie zur späteren Wartung beantwortet werden.
- Erarbeitung verallgemeinerbarer Lösungen für GEDT-Elemente und für Anschlussdetails an die konventionelle Wärmedämmung der übrigen Außenwände, an Sockel und Traufe bzw. Übergang zur Dachdämmung.
- Statische Neukonzipierung des GEDT-Tragkonzepts – unter Berücksichtigung der im Vergleich zu herkömmlichen Dämmstoffen (z. B. Mineralwolle, EPS) ungünstigeren mechanischen Eigenschaften der VIPs - mit daraus folglich notwendiger Neuentwicklung von metallenen Befestigungselementen zur Applikation der Fassadenelemente selbst sowie zur Verbindung der erforderlichen Einzelschichten der Fassadenelemente, da eine hinreichend dauerhafte statische Tragfähigkeit der VIP bislang nicht ansetzbar ist.

Die Vakuumdämmung der GEDTs unterscheidet sich wesentlich von herkömmlichen Dämmstoffen. Sie ist nicht nur ein Hochleistungsdämmstoff mit einem gegenüber herkömmlichen Dämmstoffen vielfach besseren Dämmwert, sie besitzt auch Eigengesetzmäßigkeiten, die die Verarbeitung deutlich erschweren. Hieraus erklären sich grundsätzliche Vorgehensweisen und Ausführungen bei diesem Forschungsprojekt:

- Die VIP-Hüllfläche, aluminiumbedampfte Kunststofffolie, ist extrem empfindlich. Die Vorfertigung der Elemente im Werk verringert die Beschädigungsgefahr gegenüber der Baustelle erheblich, da die Verarbeitung kontrolliert erfolgt und baustellentypische Störfaktoren ausgeschlossen werden können.
- Wärmebrücken machen sich durch die nur geringe notwendige Gesamtstärke der Vakuumdämmung, in unserem Fall 40 mm, deutlicher als bei herkömmlichen

Dämmstoffen bemerkbar. Konstruktiv notwendige Fugen und Verbindungen mussten so weit wie möglich reduziert werden.

2.2 Entwicklung der Großelementdämmtechnik (GEDT) mit Vakuumdämmung

Das Konzept der Großelementdämmtechnik wurde von dem Bochumer Ingenieurbüro IGRT entwickelt. Das vorliegende Kapitel gibt einen Überblick über die Grundideen dieses Ansatzes.

2.2.1 Historie und Grundsätze der GEDT

Die Grundsätze der Großelement-Dämmtechnik lassen sich in wenigen Stichworten zusammenfassen:

- Werkseitig vollständig vorgefertigt (witterungsunabhängig, hohes, konstantes Qualitätsniveau)
- Dämmtechnisch hochwirksam (EPS/MW, mit Perspektive VIP)
- Großformatig (z. B. geschosshoch, raumbreit)

Die Grundidee – einschließlich der Wortprägung „GEDT“ - stammt aus dem Jahre 1997 und wurde im Rahmen eines größeren Forschungsvorhabens in den Jahren 1998 bis 2004 an der Ruhr-Universität Bochum, Institut für Konstruktiven Ingenieurbau, umgesetzt.

Die entsprechenden Basisentwicklungen, zunächst noch unter Verwendung konventioneller Dämmstoffe, aber bereits unter Hinweis auf die Möglichkeit, VIPs in die Technik mit einzubinden, sind umfassend in [Reyer 2004a-d, Sieder 2004] dokumentiert.

Bei Verwendung herkömmlicher Dämmstoffe konnte das statische Zusammenwirken zwischen äußerer (z. B. Putzschicht o. a.) und innerer Deckschicht (z. B. Holzwerkstoffplatte) und Dämmschicht (z. B. Hartschaum/EPS oder Mineralwolle/MW) bei der Scheibenwirkung – als eine Art Sandwichwirkung im zweifachen Sinne – weit reichend mit in Anspruch genommen werden [Sieder 2004], was wegen mechanisch ungünstigerer Voraussetzungen von VIPs nicht mit in Ansatz gebracht werden konnte.

Ein zusätzlicher Aspekt bei der Entwicklung der GEDT lag in der Schaffung von Anreizen zur energetischen Sanierung von Altbauten (schnell, leise, qualitativ hochwertig und energetisch hoch wirksam) für bisher in diesem Sinne zögerliche Eigentümer solcher Altbauten.

Abbildung 2.2-1 zeigt die (folgenden) Kernbereiche der GEDT unter Verwendung von konventionellem Dämmstoff:

- Konstruktion:
  Anordnung von Großelementen an einer Althaus-/Giebelfassade als Beispiel
  Hier: Großelemente mit konventionellem Dämmstoff und 4-Punkt-Applikation oder Schienenbefestigung.
- Statik
  Eigengewicht, Winddruck und Windsog fassadenparallel und fassadensenkrecht, ggf. Erdbeben fassadenparallel und fassadensenkrecht, thermische und hygrische Einflüsse
- Bauphysik
  Thermische und feuchtetechnische Einflüsse; Schall und Feuchtigkeit als Fluid (Regen), Brandschutz
- Detailpunkte
  Vertikal- und Horizontalfugen, Fugenkreuzungspunkte, Befestigungs- bzw. Verbindungspunkte, Anschlusspunkte usw.
- Vermessung
  Berührungslose Vermessung und Kennzeichnung der Applikationspunkte mit Laser
- Punkt- und Schienenbefestigung:
  Die Großelemente mit konventionellen Dämmstoffen konnten wegen ihrer zuvor erwähnten „Sandwichtragwirkung im doppelten Sinne“ punktbefestigt (in 4 Punkten) oder schienenbefestigt (an oberer und unterer Schiene) appliziert werden.
- Transport und Montage:
  Gegebenenfalls mit einer Technik, die auch die Applikation der Großelemente per Kran bei größeren Dachüberständen ermöglicht

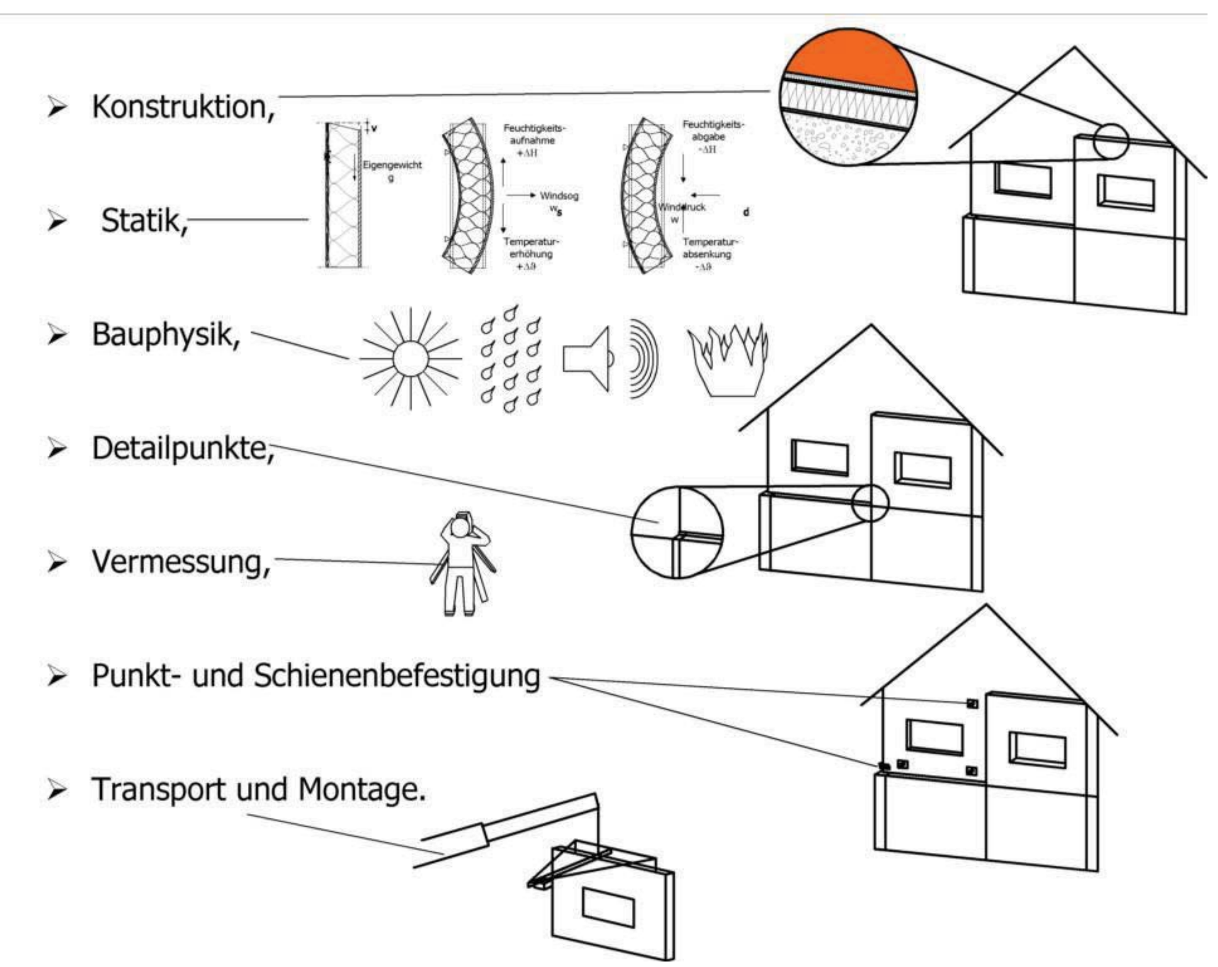
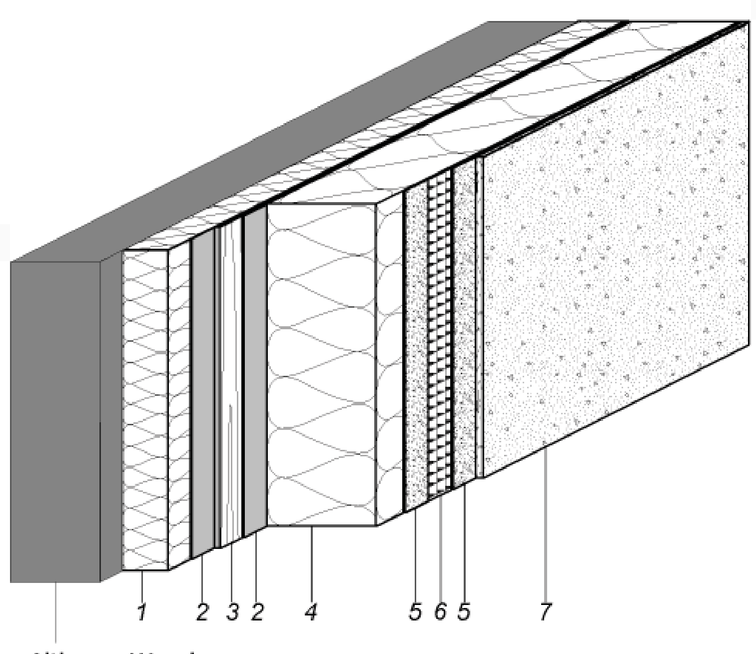


Abbildung 2.2-1: Kernbereiche der GEDT unter Verwendung von konventionellem Dämmstoff

Der grundsätzliche Aufbau eines GEDT-Elementes unter Verwendung von konventionellem Dämmstoff mit einer bewehrten Putzschicht als äußere Beplankung ist in Abbildung 2.2-2 dargestellt. Die innere Beplankung wird aus einer Holzwerkstoffplatte (BFU) hergestellt.

Aus statischer Hinsicht wird der Verbund zwischen innerer und äußerer Beplankung zusammen mit der Hauptdämmschicht genutzt (s. [Reyer 2004a-d, Sieder 2004], insbesondere zur Statik [Sieder 2004].



Schichten:

1 - Ausgleichsdämmschicht
(zusammendrückbare MW)
2 - PUR-Klebstoff
3 - Holzwerkstoffplatte
("innere Beplankung")
4 - Hauptdämmschicht
5 - Armierungs-, Klebemörtel
6 - Armierungsgewebe
7 - Oberputz, Deckschicht

} "äußere Beplankung" (5–7)

Abbildung 2.2-2: Grundsätzlicher Aufbau eines GEDT-Elementes unter Verwendung von konventionellem Dämmstoff mit einer bewehrten Putzschicht als äußere Beplankung

Der konstruktive Aufbau eines Großelementes mit konventionellem Dämmstoff wird durch die Anordnung und Art der Verbindungen zwischen den einzelnen Schichten bestimmt (Abbildung 2.2-3):

- punktuelle (oder linienförmige) Verbindung mit metallischen Verbindern zwischen Althauswand und innerer Beplankung
- flächige Verbindung zwischen innerer Beplankung und Hauptdämmschicht
- flächige Verbindung zwischen Hauptdämmschicht und äußerer Beplankung (hier: bewehrte Putzschicht)

Abbildung 2.2-3 stellt die Befestigungsarten der 3 Verbindungsebenen eines Großelementes mit konventionellem Dämmstoff dar:

- Befestigungsebene ①: mechanische Punkt- bzw. Schienenbefestigungen
- Befestigungsebene ② und ③: flächige klebetechnische Verbindungen

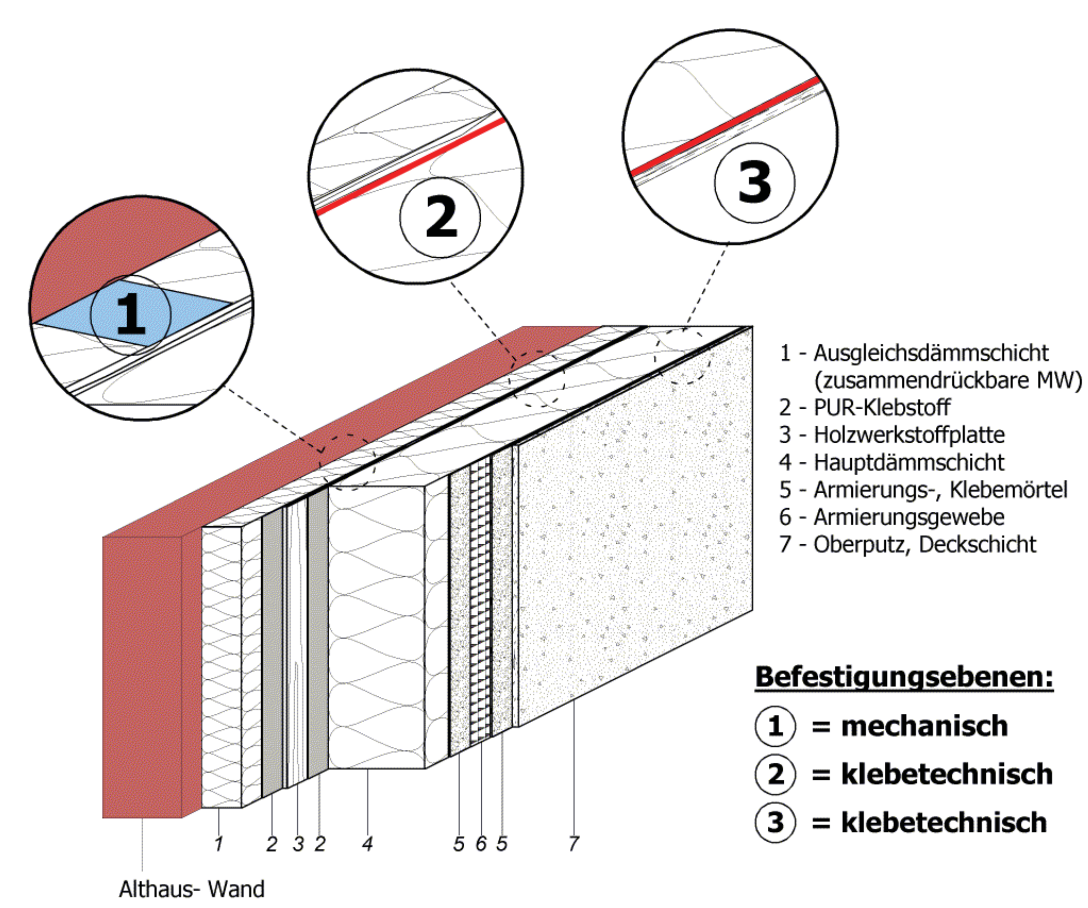


Abbildung 2.2-3: Grundsätzlicher Aufbau eines GEDT-Elementes unter Verwendung von konventionellem Dämmstoff mit einer bewehrten Putzschicht als äußere Beplankung

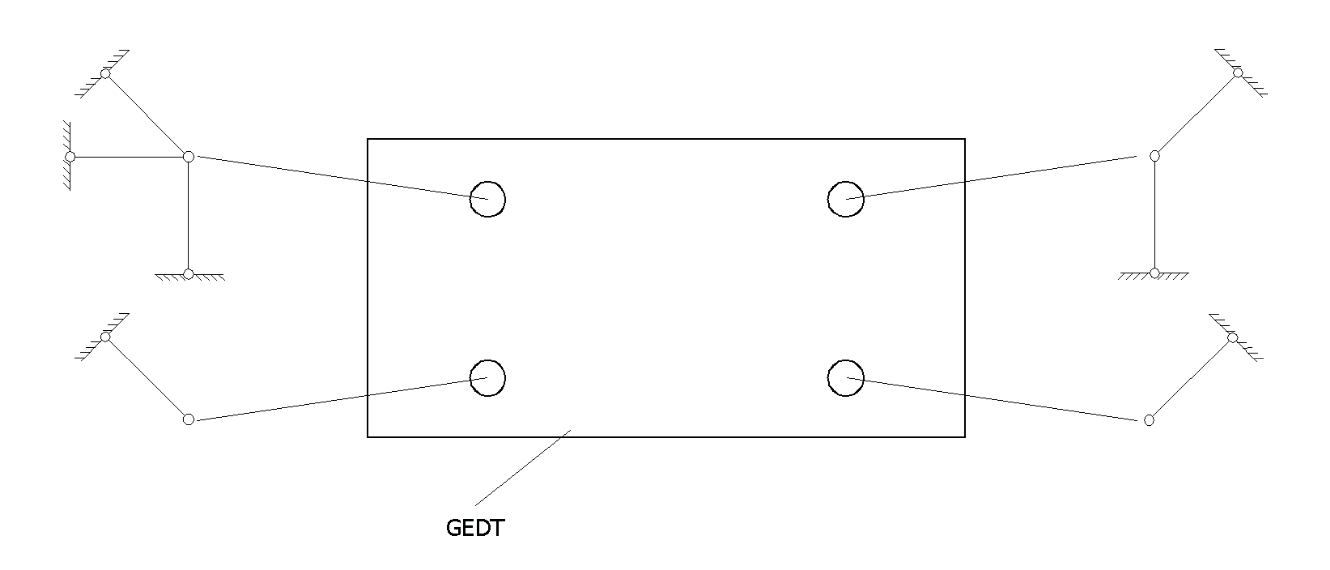
Abbildung 2.2-4 zeigt die Punktbefestigung mit 4 Befestigungspunkten, ihre Lagerbedingungen und die aufzunehmenden Lasten aus Eigengewicht, Wind und Erdbeben bei einem GEDT mit konventionellem Dämmstoff.

Für die 4 Punkt-Befestigungspunkte des Großelementes an der Althauswand gilt im statischen Sinne:

Links oben:	Rechts oben:
– Festpunkt mit Halterung in Fassadenlängsrichtung (x-Richtung), Fassadenhöhenrichtung (y-Richtung) und senkrecht zur Fassadenebene (z-Richtung)	– Gleitpunkt in Fassadenlängsrichtung (x-Richtung) – Festpunkt in Fassadenhöhenrichtung (y-Richtung) und senkrecht zur Fassadenebene (z-Richtung)
Links unten:	**Rechts unten:**
– Gleitpunkt in Fassadenlängsrichtung (x-Richtung) und in Fassadenhöhenrichtung (y-Richtung) – Festpunkt senkrecht zur	– Gleitpunkt in Fassadenlängsrichtung (x-Richtung) und in Fassadenhöhenrichtung

Fassadenebene (z-Richtung)		(y-Richtung) – Festpunkt senkrecht zur Fassadenebene (z-Richtung)

Befestigungspunkte



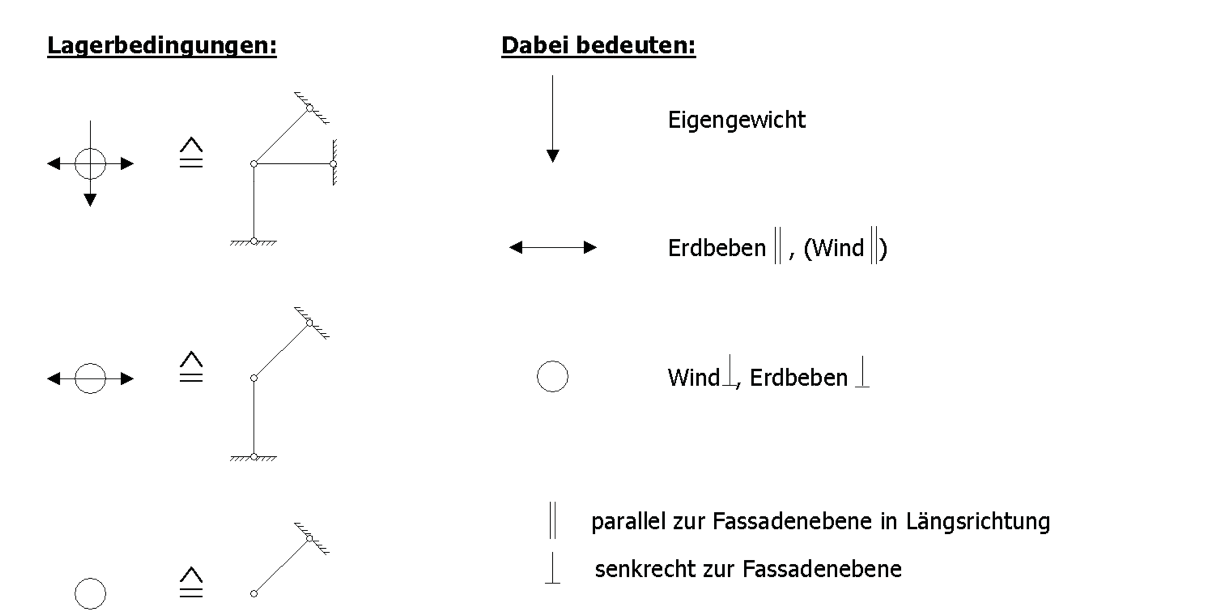
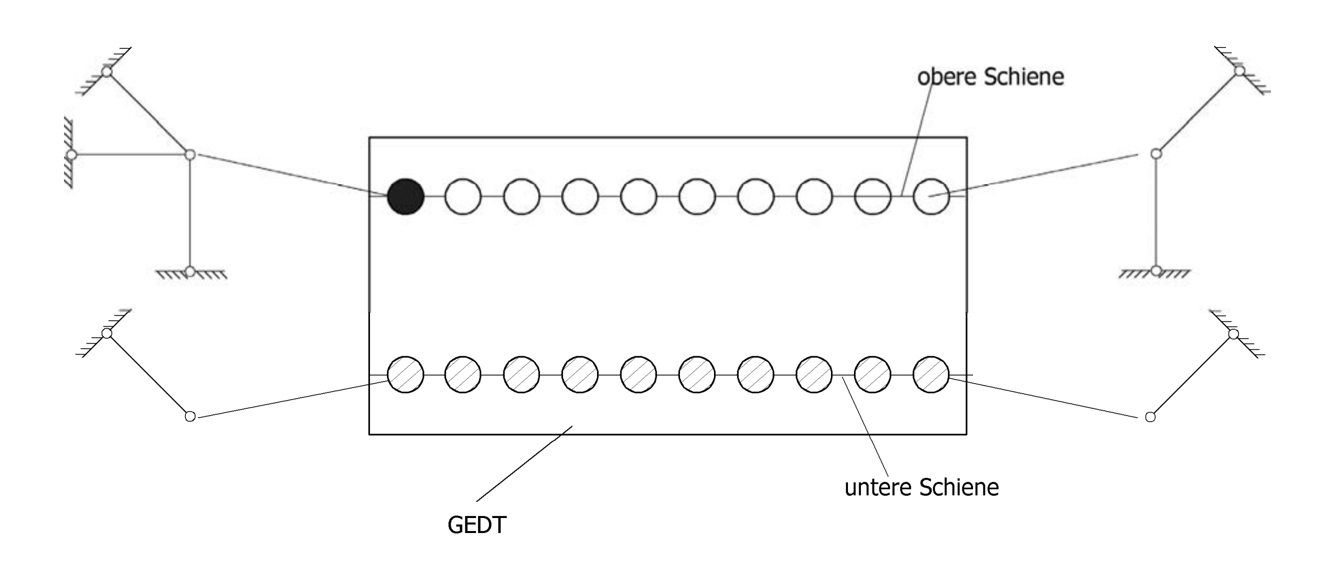


Abbildung 2.2-4: Großelementdämmtechnik mit konventionellem Dämmstoff: Punktbefestigung mit 4 Befestigungspunkten, ihre Lagerbedingungen und die aufzunehmenden Lasten aus Eigengewicht, Wind und Erdbeben

Abbildung 2.2-5 zeigt die Schienenbefestigung mit 2 Befestigungsschienen (oben und unten), ihre Lagerbedingungen und die aufzunehmenden Lasten aus Eigengewicht, Wind und Erdbeben bei der Großelementdämmtechnik mit konventionellem Dämmstoff.
Im Falle einer Schienenbefestigung trägt die obere Schiene Lasten senkrecht zur Fassadenebene und Lasten aus Eigengewicht. Mindestens ein Punkt der oberen Schiene

(vgl. Abbildung 2.2-5 links oben) wird als Festpunkt mit Halterung in Fassadenlängsrichtung (x Richtung) ausgebildet.
Die untere Schiene nimmt lediglich Lasten senkrecht zur Fassadenebene (z-Richtung) auf.

Befestigungsschienen



Lagerbedingungen: **Dabei bedeuten:**

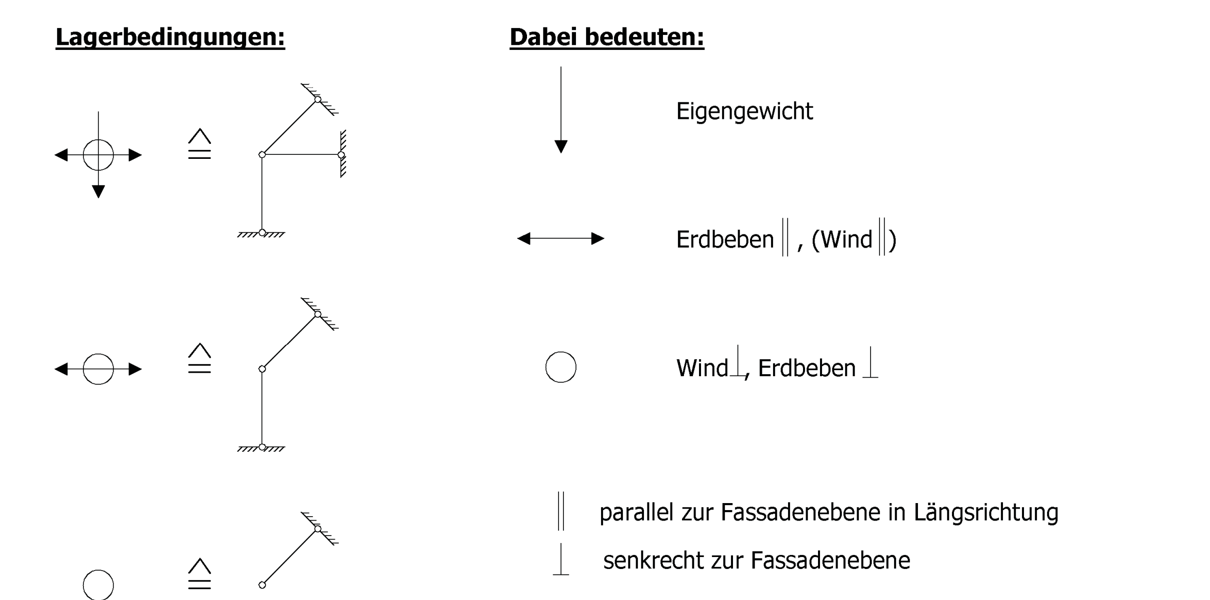


Abbildung 2.2-5: Großelementdämmtechnik mit konventionellem Dämmstoff: Schienenbefestigung mit 2 Befestigungsschienen (oben und unten), ihre Lagerbedingungen und die aufzunehmenden Lasten aus Eigengewicht, Wind und Erdbeben

2.2.2 GEDT mit Vakuumdämmung: Grundsätze

Die nun verwendeten VIP-Dämmelemente unterscheiden sich deutlich von den konventionellen Dämmstoffen.

Allgemeines zu den verwendeten VIP-Dämmelementen:

- VIP: Strukturkern, Folienhülle (PE-Al-PET)
- Zustand: evakuiert (Gasdruck p < 5 mbar)
- Dichte: 160 – 180 kg/m^3

Die wichtigsten statischen Besonderheiten der verwendeten VIP-Dämmelemente als Bestandteil eines Großelementes der GEDT sind:

- Keine statische Funktion des VIP zur Übertragung von Zugkräften aus Windsog (W+) und Erdbeben ($H_{\perp,+}$)
- Keine statische Funktion des VIP zur Übertragung von Schubkräften [aus Eigengewicht (Wetterschutzschale + BFU-Platte) und Erdbeben ($H_{\parallel\pm}$)]
- Statisch im Prinzip nur durch Flächendruck belastbar, vgl. [Cremers 2006], (Winddruck, Druckwirkung aus Erdbeben senkrecht zur Fassade.

Anmerkung:
Im Rahmen der Forschungsarbeiten wurden einige „vorsichtige“ Tastversuche bzgl.

- Zugübertragungsfähigkeit bei Zug senkrecht zur VIP-Element-Mittelebene und
- Schubübertragungsfähigkeit (Schub aufgrund von Querkräften parallel zur VIP-Element-Mittelebene

durchgeführt.
Diese Versuche wurden sowohl an voll funktionstüchtigen, evakuierten VIP (Gasdruck p < 5 mbar) als auch an absichtlich beschädigten, belüfteten VIP-Elementen durchgeführt.

Diese Versuche hatten jedoch lediglich ersten Testcharakter und die Randbedingungen entsprachen noch nicht den hohen Präzisionsbedingungen zur Veröffentlichung geeigneter experimenteller Untersuchungen.
Dennoch wird hier festgehalten:

- Erwartungsgemäß waren die statischen Eigenschaften voll funktionstüchtiger, evakuierter VIP-Elemente besser als die belüfteter VIPs.
- Gewisse - über die Aufnahmefähigkeit flächiger Druckspannungen hinausgehende - statische Werte waren bei voll funktionstüchtigen, evakuierten VIPs durchaus festzustellen, bei belüfteten jedoch nicht.
- Bei den hier vorliegenden Entwicklungen von Großelementen mit VIP wurde nur von der Aufnahmefähigkeit von Flächendruck (s. zuvor) bzgl. der VIP ausgegangen, andere statische Eigenschaften wurden konstruktiv und rechnerisch nicht herangezogen.

Der Querschnittsaufbau der Großelemente mit VIP-Dämmung als Hauptdämmschicht ist in Abbildung 2.2-6 dargestellt.
Bei der Ausgleichsdämmung handelt es sich um leicht zusammendrückbare Mineralwolle, die sich den leichten Oberflächen-Unebenheiten der Althauswand anpasst und damit die Entstehung unerwünschter Luftspalte zwischen Althauswand und GEDT-Element verhindert.
Die VIP-Schicht liegt zwischen der inneren Beplankung (27 mm KERTO-Platte als hintere Tragplatte) und der äußeren Beplankung (18 mm BFU-Platte).
Sowohl zwischen der inneren Beplankung (KERTO) und dem VIP als auch zwischen der äußeren Beplankung (BFU) und dem VIP befindet sich jeweils eine Schutzschicht, um eine Verletzung der empfindlichen VIP-Dämmplatten zu verhindern.

Die hinterlüftete Bekleidung (Wetterschutzschale aus Harzkompositplatten) wurde auf vertikalen Alu-Hohlprofilen (ihrerseits auf der äußeren Beplankung (BFU) appliziert) mittels zugelassenem Klebsystem (SIKA) befestigt.
Durch die Anordnung dieser hinterlüfteten Wetterschutzschale mit ihrer eigenen Geometrie erfolgte eine interessante optische Entkopplung der Fassade von der Geometrie der Großelemente selbst.

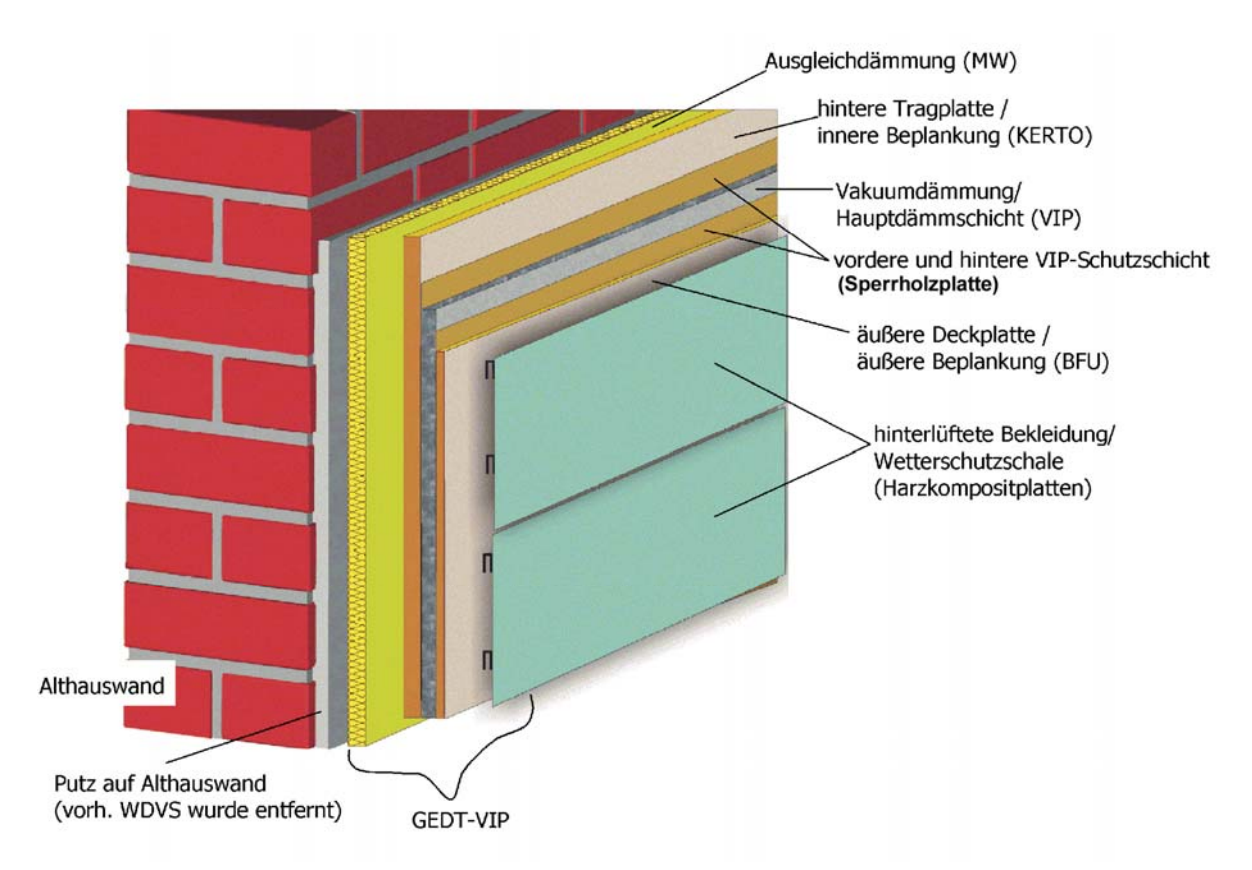


Abbildung 2.2-6: Querschnittsaufbau der Großelemente mit Vakuum-Dämmschicht (VIP)

Die Einteilung der Großelemente an den straßenseitigen Fassaden der drei baugleichen Gebäude in Hofheim ist detailliert in Abbildung 2.2-7 dargestellt, ausschließlich an einer linken Haushälfte, da die Gebäude in ihrer Längsrichtung symmetrisch sind. Des Weiteren zeigt Abbildung 2.2-7 die Abmessungen und Lage der Großelemente GEDT 1 und GEDT 2 sowie der Füllelemente (FÜLL-GEDT A und FÜLL-GEDT B) und die Anordnung der Befestigungspunkte der inneren Beplankung (Tragschicht aus 27 mm KERTO-Platte).
Die Abmessungen der Großelemente betragen:

GEDT 1: l x h = 5,25 m x 3,25 m
GEDT 2: l x h = 5,25 m x 2,50 m

Wie bereits zuvor angemerkt, sind die Abmessungen der GEDT selbst nach Applikation der Wetterschale dem Betrachter nicht mehr sichtbar.

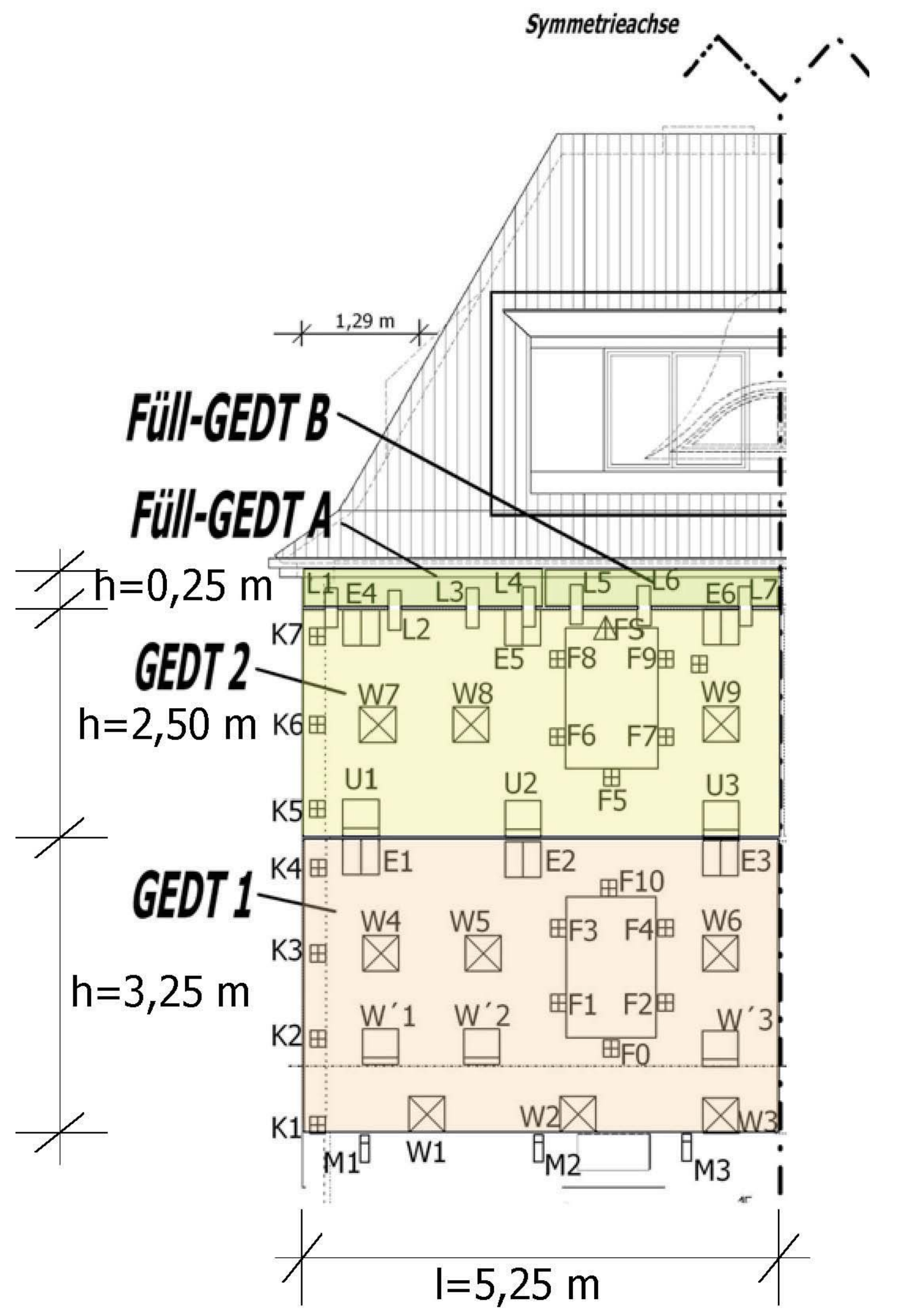


Abbildung 2.2-7: Querschnittsaufbau der Großelemente mit Vakuum-Dämmschicht (VIP)

2.2.3 GEDT mit Vakuumdämmung: Befestigungsebenen und Befestigungspunkte

Da bei den GEDT mit Vakuumdämmung im Gegensatz zu den GEDT mit herkömmlicher Dämmung der Hauptdämmschicht (wie bereits erläutert) keine tragende Funktion (außer Druck senkrecht zur Fassadenebene) zugewiesen werden kann, müssen die Lasten der Befestigungsebenen 1-3 (vgl. Abbildung 2.2-8) durch metallische Verbinder weitergeleitet werden.

Abbildung 2.2-8 zeigt die Befestigungsebenen an einem Großelement mit Vakuumdämmung mit dem Schema der Befestigungsebenen (Verbindungsebenen) und deren Realisierung (mechanisch, klebetechnisch).

Die in Abbildung 2.2-8 beschriebenen 4 Verbindungs- bzw. Befestigungsebenen werden im Weiteren in Tabelle 2.2-1 spezifiziert.

Tabelle 2.2-1: Vier Verbindungs- bzw. Befestigungsebenen, Befestigungsart, -form und Material

Befestigungs- bzw. Verbindungsebene Nr.	Befestigungsart	Befestigungsform	Material Weitere Details s. auch Anhang II
①	mechanisch	punktförmig	St 37-3 bzw. St 52-3, verzinkt, Ankerstangen mit aus NR-Stahl
②	mechanisch	punktförmig	Nicht rostender Stahl der Widerstandsklasse III/mittel nach Tab. 1 der A.b.Z.
③	mechanisch	punktförmig	Aluminium AlMgSi 0,5 nach DIN 1725 (bzw. EN AW-AlMgSi lt DIN EN 573-3), nicht rostender Stahl der Widerstandsklasse III/mittel nach Tab. 1 der A.b.Z.
④	klebetechnisch	linienförmig	Bauaufsichtlich zugelassenes Klebesystem (SIKA)

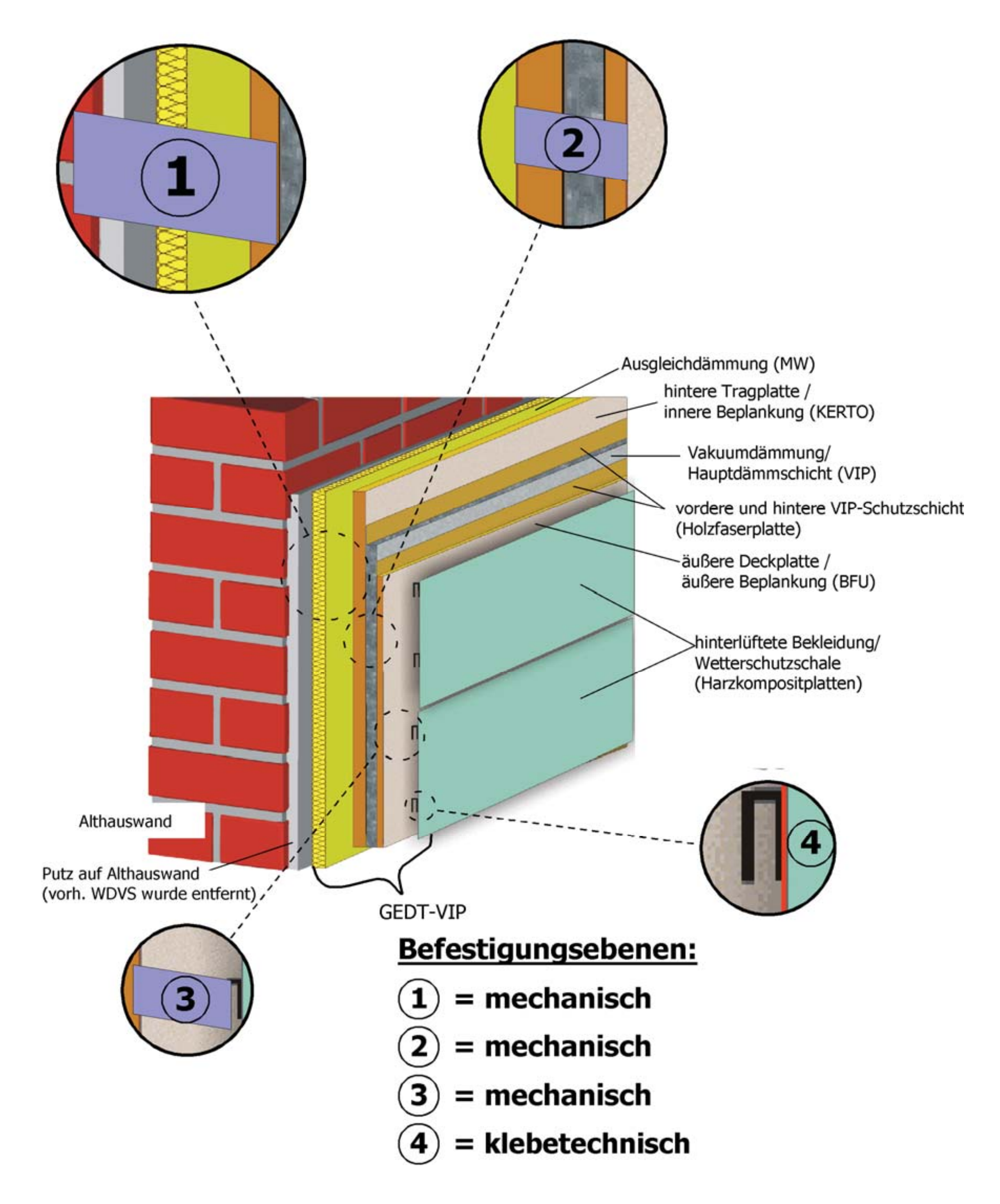
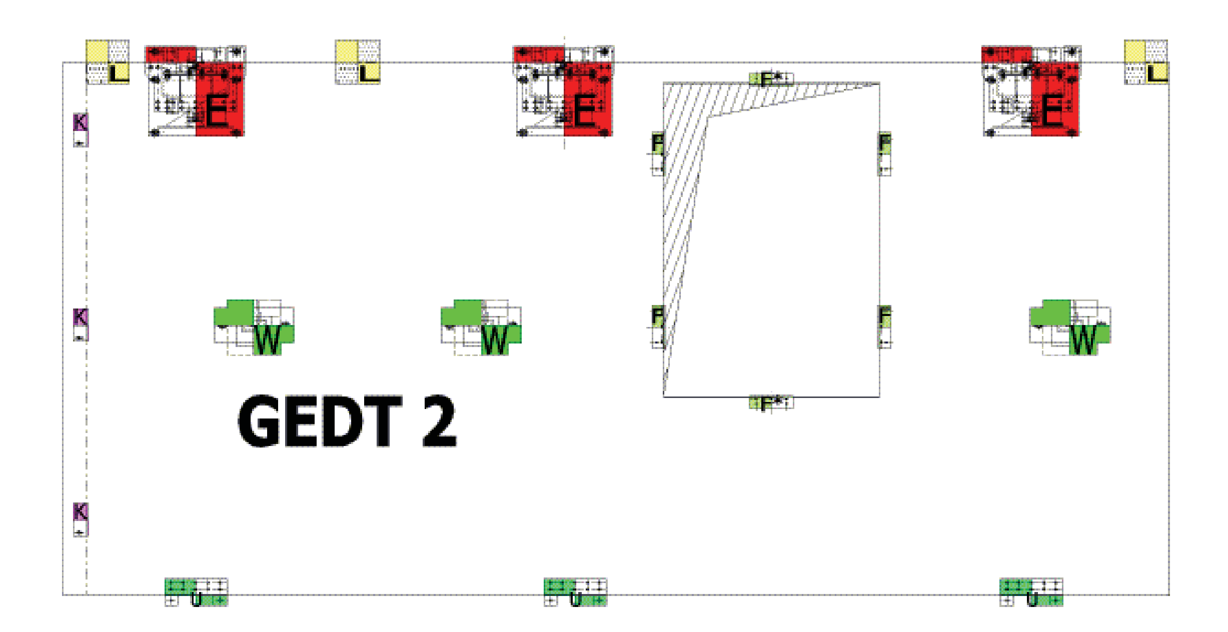


Abbildung 2.2-8: Befestigungsebenen an einem Großelement mit Vakuumdämmung – Schema der Befestigungsebenen (Verbindungsebenen) und deren Realisierung (mechanisch, klebetechnisch)

Abbildung 2.2-9 zeigt die Verbindungs- bzw. Befestigungsebene 1 zwischen Althauswand und innerer Beplankung (KERTO) und die Anordnung der Befestiger der Befestigungsebene 1 innerhalb eines GEDT 2 mit zugeordneter Last-Funktionalität.



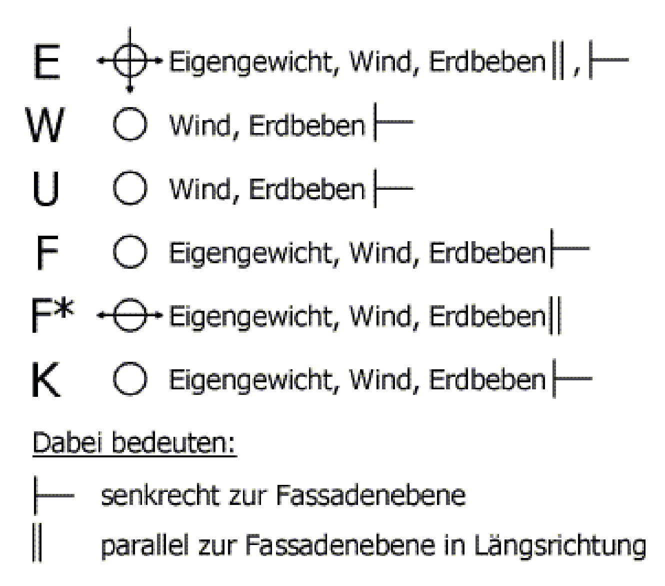


Abbildung 2.2-9: Befestigungsebene 1 an einem Großelement mit Vakuumdämmung – Anordnung der Befestiger der Befestigungsebene 1 mit zugeordneter Last-Funktionalität

Abbildung 2.2-10 zeigt eine Prinzipdarstellung der konstruktiven Ausführung der Befestigungspunkte der Befestigungsebene 1 (E, W und U) an dem Vertikalschnitt eines Großelementes mit Vakuumdämmung.

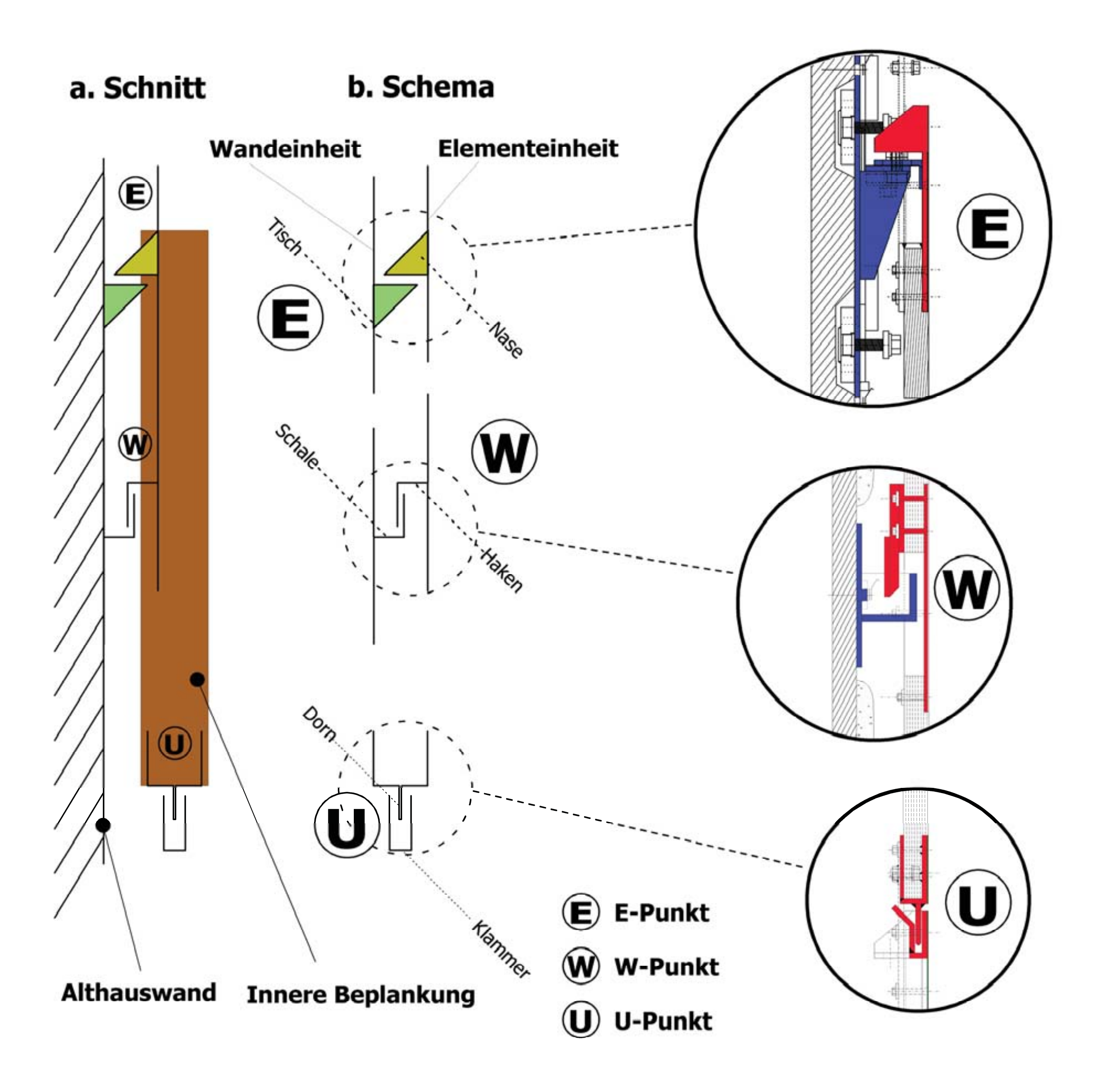
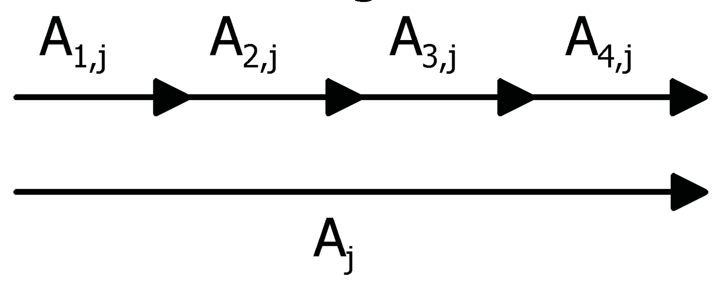


Abbildung 2.2-10: Prinzipdarstellung der konstruktiven Ausführung der Befestigungspunkte der Befestigungsebene 1 (E, W und U) an dem Vertikalschnitt eines Großelementes mit Vakuumdämmung

Bei der vorliegenden GEDT mit VIP, bei der die Großelemente (bis auf die Wetterschutzschale) vollständig vorgefertigt werden und ohne Nachbesserungsmöglichkeiten vor Ort an (Althaus-)fassadenseitige Befestigungselemente appliziert werden, kommt der Vorabbetrachtung möglicher Quellen für Abweichungen sowie

deren mögliche „worst case“-Summierung besondere Bedeutung zu. Schließlich muss die worst case-Summierung möglicher Abweichungen bei der Planung der Justagemöglichkeiten an den einzelnen Befestigern selbst sowie bei der Planung von notwendigen Fugentoleranzen bedacht werden. Abbildung 2.2-11 zeigt Quellen für mögliche Teilabweichungen vom SOLL und Darstellung der ungünstigsten (worst case-)Summierung möglicher Abweichungen. Diese Betrachtungen müssen in alle Koordinaten-Richtungen gemacht werden.

Teilabweichungen



Gesamtabweichung

$$A_j = \sum_{i=1}^{4} A_{i,j}$$

$$j \in x, y, z$$

z.B.:
A_1 = Abweichung Erstvermessung
A_2 = Abweichung Fertigung im Werk
A_3 = Abweichung "Abstecken" Verbinder
A_4 = Abweichung Montage Verbinder

Abbildung 2.2-11: Befestigungsebenen an einem Großelement mit Vakuumdämmung – Schema der Befestigungsebenen (Verbindungsebenen) und deren Realisierung (mechanisch, klebetechnisch)

Aus den in Abbildung 2.2-11 aufgezeigten Quellen für mögliche Teilabweichungen vom SOLL und Darstellung der ungünstigsten (worst case-)Summierung möglicher Abweichungen ergeben sich die Größe und Art der am jeweiligen Konstruktionspunkt/-element notwendigen Justageoptionen. Die Justageoptionen am E-Befestiger beispielsweise werden notwendig aus möglichen Abweichungen vom SOLL bei:

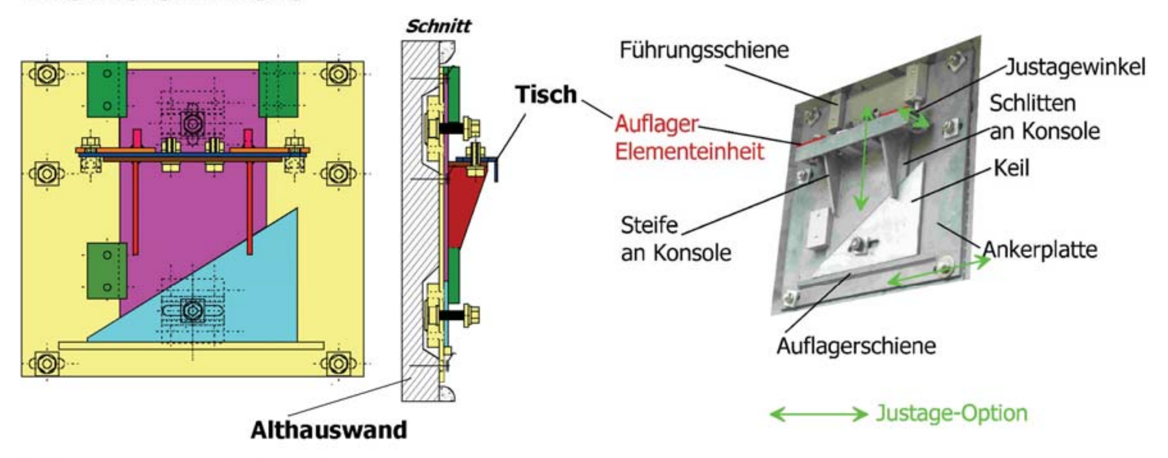
- Vermessung der Althausfassade
- Absteckung der Befestigungspunkte
- Montage der Befestigungspunkte
- Herstellung der GEDT.

Die Notwendigkeit der Justage der Befestigungen vor Ort beeinflusst den Aufwand an vorzusehenden Justagemöglichkeiten, die worst case-Summierung möglicher Abweichungen die maximal vorzusehenden Justageabmessungen.

Abbildung 2.2-12 zeigt unter Aufzeigung der Justage-Optionen (in allen 3 Achsrichtungen x,y,z) Wand- und Elementeinheit eines E-Befestigers mit Bezeichnung wichtiger Einzelbestandteile in Plan und Fotografie. Montagetechnisch wird eine Konsole an der Elementeinheit auf den zuvor genau ausgerichteten Tisch der Wandeinheit aufgesetzt und mittels GV-Verbindung (gleitfeste, vorgespannte Verbindung) verschraubt.

Abbildung 2.2-13 zeigt unter Aufzeigung der Justage-Optionen (in allen 3 Achsrichtungen x,y,z) Wand- und Elementeinheit eines W-Befestigers mit Bezeichnung wichtiger Einzelbestandteile in Plan und Fotografie.
Montagetechnisch wird bei der Montage der W-Befestiger der „Haken" in der Mitte der Elementeinheit in die (mit schnell bindendem Mörtel gefüllte) „Schale" der Wandeinheit eingehängt und über die M-Punkte am unteren Elementrand in passender Position justiert. Der W-Punkt verbleibt nach Aushärten des Mörtels in dieser Position.

Wandeinheit



Elementeinheit

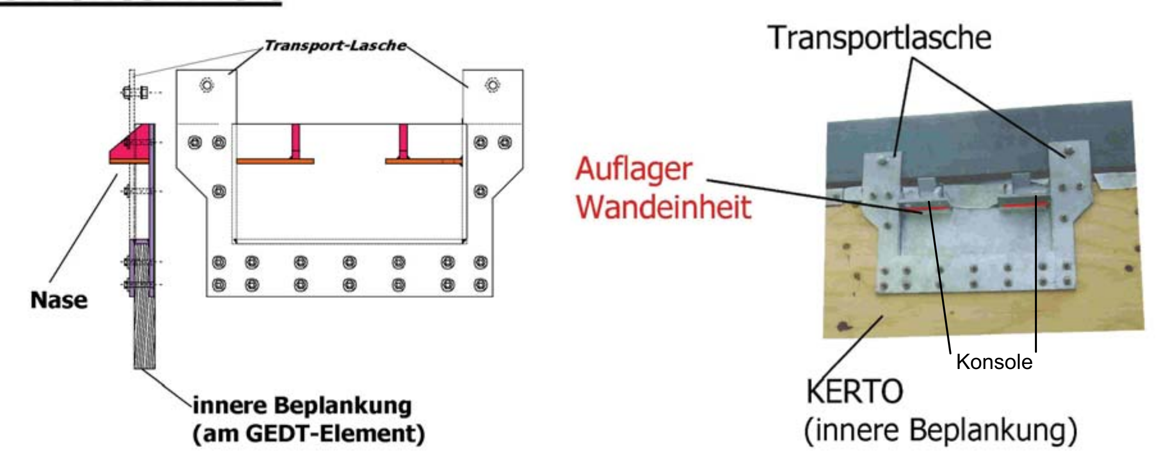


Abbildung 2.2-12: Wand- und Elementeinheit eines E-Befestigers mit Bezeichnung wichtiger Einzelbestandteile unter Aufzeigung der Justage-Optionen in Plan und Fotografie

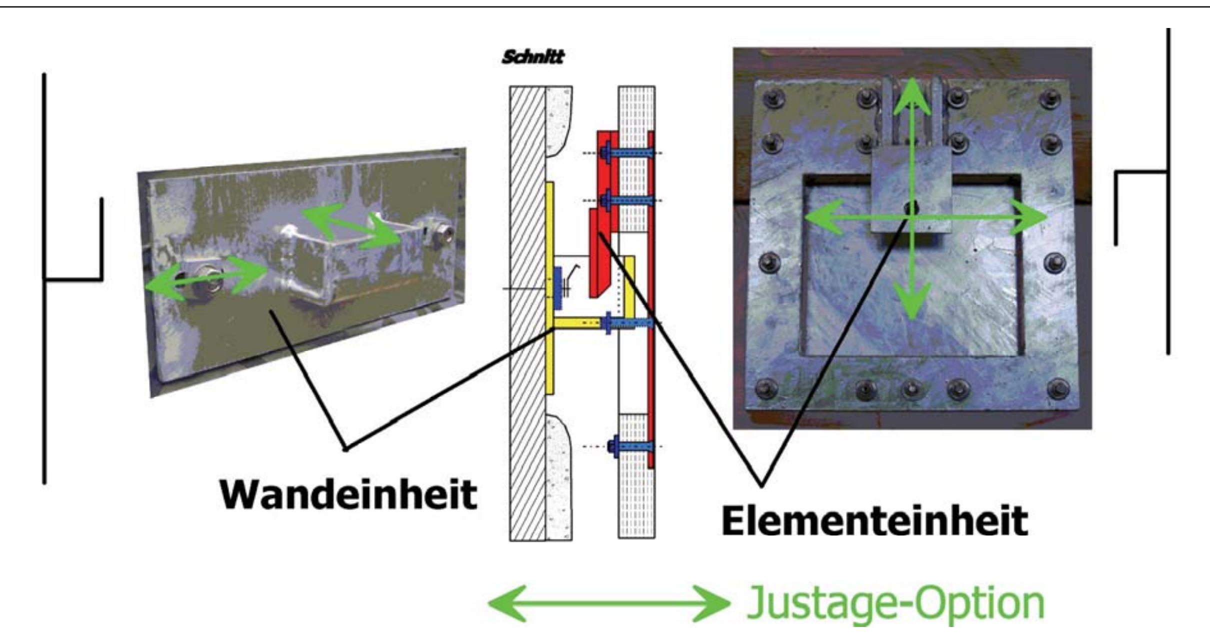


Abbildung 2.2-13: Wand- und Elementeinheit eines W-Befestigers mit Bezeichnung wichtiger Einzelbestandteile unter Aufzeigung der Justage-Optionen in Plan und Fotografie

Die Befestigungen (Verbindungen) der Befestigungsebene 2 gewährleisten die Übertragung der Lasten von der äußeren Beplankung zur inneren Beplankung. Abbildung 2.2-14 zeigt die Anordnung der Befestigungen (Verbindungen) der Befestigungsebene 2, die Befestigungspunkte (Verbindungspunkte PG, PW und PHW).

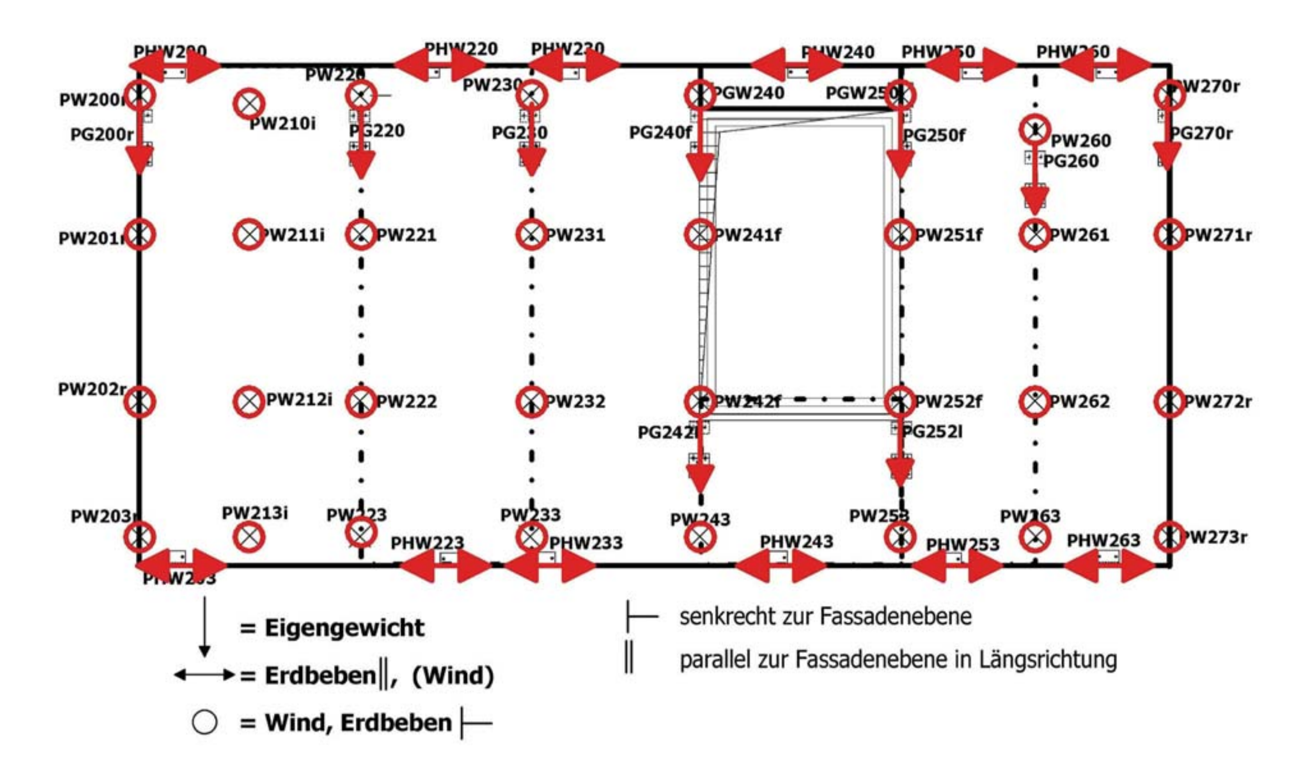


Abbildung 2.2-14 Anordnung der Befestigungen (Verbindungen) der Befestigungsebene 2, Befestigungspunkte (Verbindungspunkte PG, PW und PHW)

Abbildung 2.2-15 zeigt eine Prinzipdarstellung der konstruktiven Ausführung der Befestigungspunkte (Verbindungspunkte PG, PW und PHW) der Befestigungsebene 2 an dem schematisierten Vertikalschnitt eines Großelementes mit Vakuumdämmung mit Darstellung von innerer Beplankung (27 mm KERTO) und äußerer Beplankung (18 mm BFU) mit dazwischen liegender Hauptdämmschicht (VIP).
Die metallischen Verbinder greifen durch die VIP-Hauptdämmschicht hindurch. Die Verbindungspunkte der Befestigungsebene 2 werden aus nicht rostendem Stahl der Widerstandsklasse III/mittel gefertigt.

PG-Punkte (PGr-Punkte am Elementrand) übertragen Eigengewichtskräfte (G).
PW-Punkte übertragen Windkräfte senkrecht zur Fassadenebene. Je nach Lage der Punkte im Großelement selbst unterscheidet man nach:

- r am Elementrand
- i innerhalb einer BFU-Platte
- f im Bereich der Fensterleibung
- l im Bereich der Fensterbrüstung

PHW-Punkte übertragen Lasten aus Wind und Erdbeben in Element-Längsrichtung und senkrecht zur Fassadenebene.

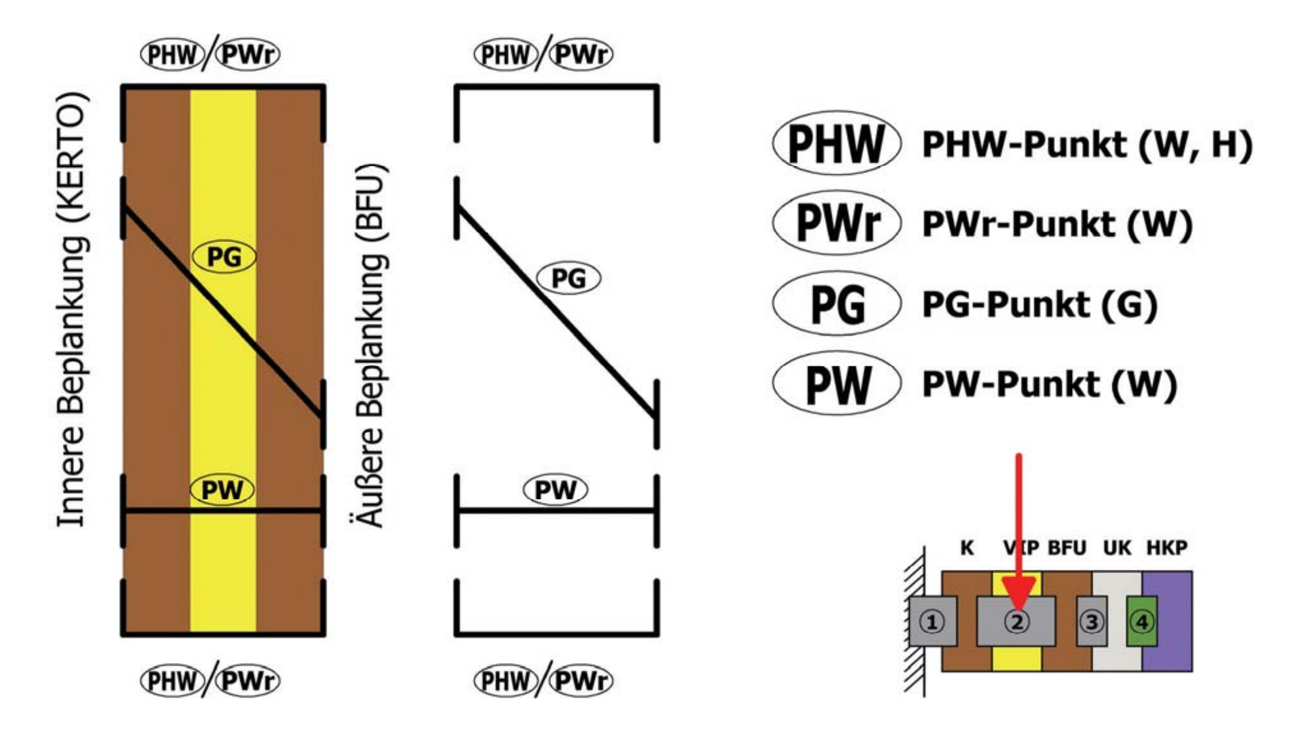


Abbildung 2.2-15 **Prinzipdarstellung der konstruktiven Ausführung der Befestigungspunkte (Verbindungspunkte PG, PW und PHW) der Befestigungsebene 2 an dem schematisierten Vertikalschnitt eines Großelementes mit Vakuumdämmung mit Darstellung von innerer und äußerer Beplankung mit zwischenliegender Hauptdämmschicht (VIP)**

Abbildung 2.2-16 zeigt einen am Elementrand liegenden PG-Punkt, daher die Bezeichnung PGr(and) zur Abtragung der Eigenlasten aus äußerer Beplankung und Wetterschutzschale an die innere Beplankung.

Die Alu-Unterkonstruktion (Alu-Hohlprofile 50x20 bzw. 100x20 mm) der Wetterschutzschale wird aus xAlMgSi 0,5 nach DIN 1725 (bzw. EN AW-AlMgSi lt DIN EN 573-3) ausgeführt. Die Befestigung der Alu-Unterkonstruktion der Wetterschutzschale an der äußeren Beplankung (18 mm BFU) wurde als Befestigungsebene 3 bezeichnet.

Abbildung 2.2-17 zeigt die Befestigungsebene 3, die Befestigung der Alu-Unterkonstruktion der Wetterschutzschale an der äußeren Beplankung und die Lage der Alu-Schienen und deren Befestigung über Fixpunkte und Gleitpunkte.

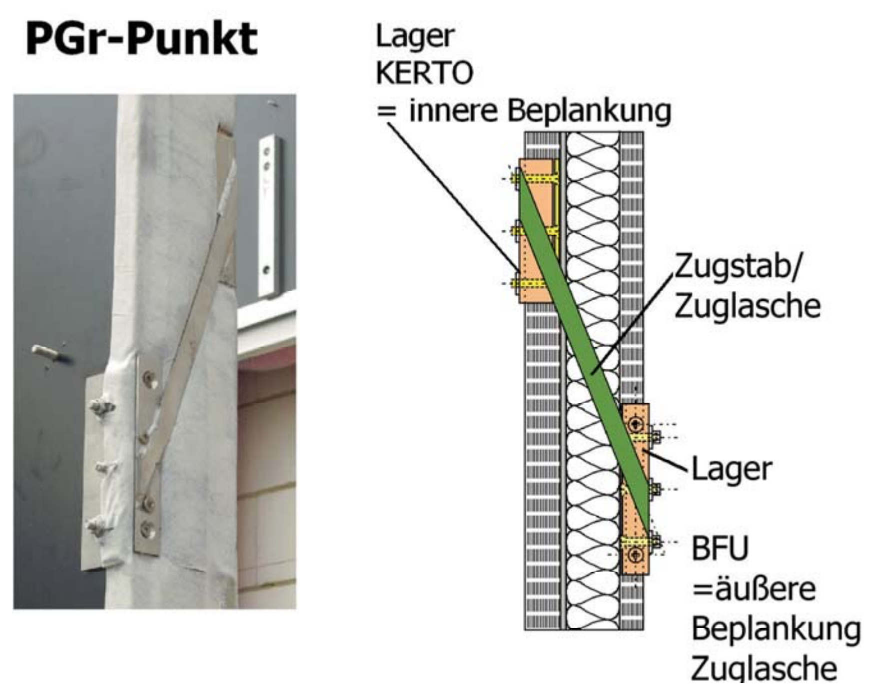
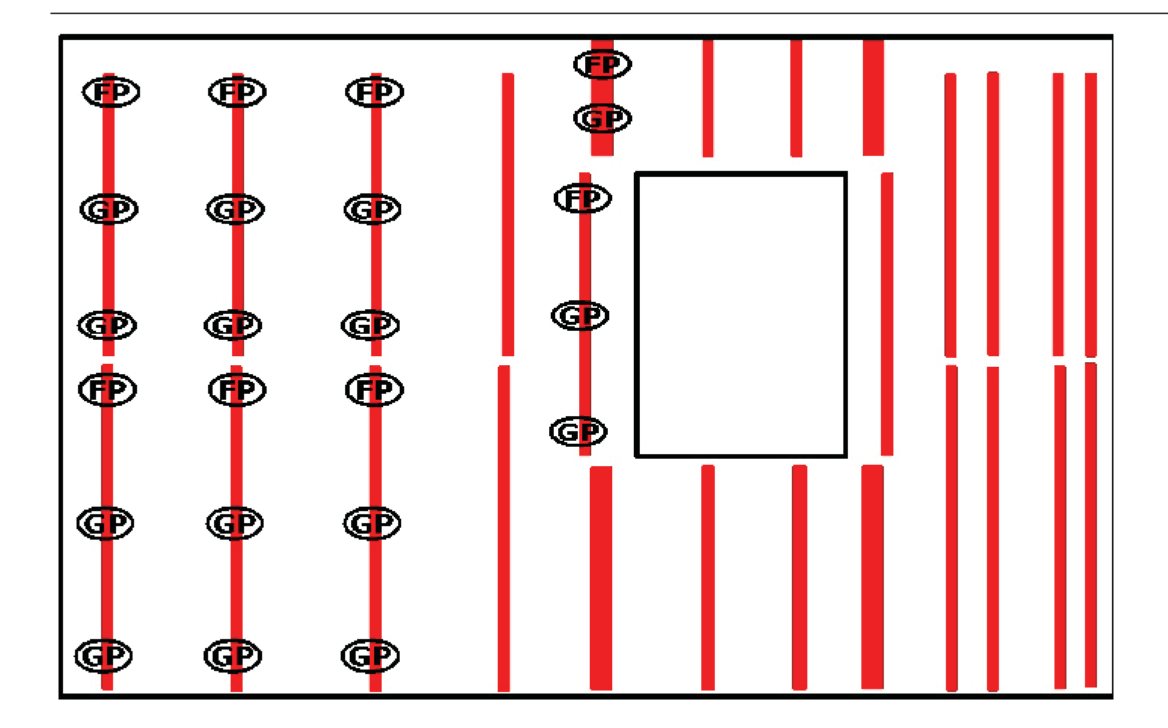


Abbildung 2.2-16 PG-Punkt am Rand des Großelementes (daher „PGr"-Punkt, (vgl. auch Übersicht Abbildung 2.2-14)



FP Festpunkt GP Gleitpunkt

Abbildung 2.2-17 Befestigungsebene 3 (Verbindungsebene 3): Befestigung der Alu-Unterkonstruktion der Wetterschutzschale an der äußeren Beplankung, Lage der Alu-Schienen und deren Befestigung über Fixpunkte und Gleitpunkte

Die Festpunkte übertragen Eigengewicht und Lasten aus Windsog und Erdbeben (senkrecht zur Fassade und in Fassadenlängsrichtung), die Gleitpunkte nur Lasten aus Windsog und Erdbeben (senkrecht zur Fassade und in Fassadenlängsrichtung). Die Befestigung über Festpunkte und Gleitpunkte werden durch thermische Längenänderungen der Alu-Unterkonstruktion erforderlich, ebenso begrenzte Schienenlängen und waagerechte Stoßfugen zwischen einzelnen Schienen.
Abbildung 2.2-18 zeigt die Anordnung von Festpunkt (FP) und Gleitpunkt (GP) der Alu-Hohlprofile der Unterkonstruktion der Wetterschutzschale an der äußeren Beplankung sowie der Fuge zwischen den übereinander liegenden Alu-Hohlprofilen.
Abbildung 2.2-19 zeigt vertikale Alu-Hohlprofile auf der äußeren Beplankung vor Applikation der Wetterschutzschale mit Festpunkt (FP) und Gleitpunkten (GP)

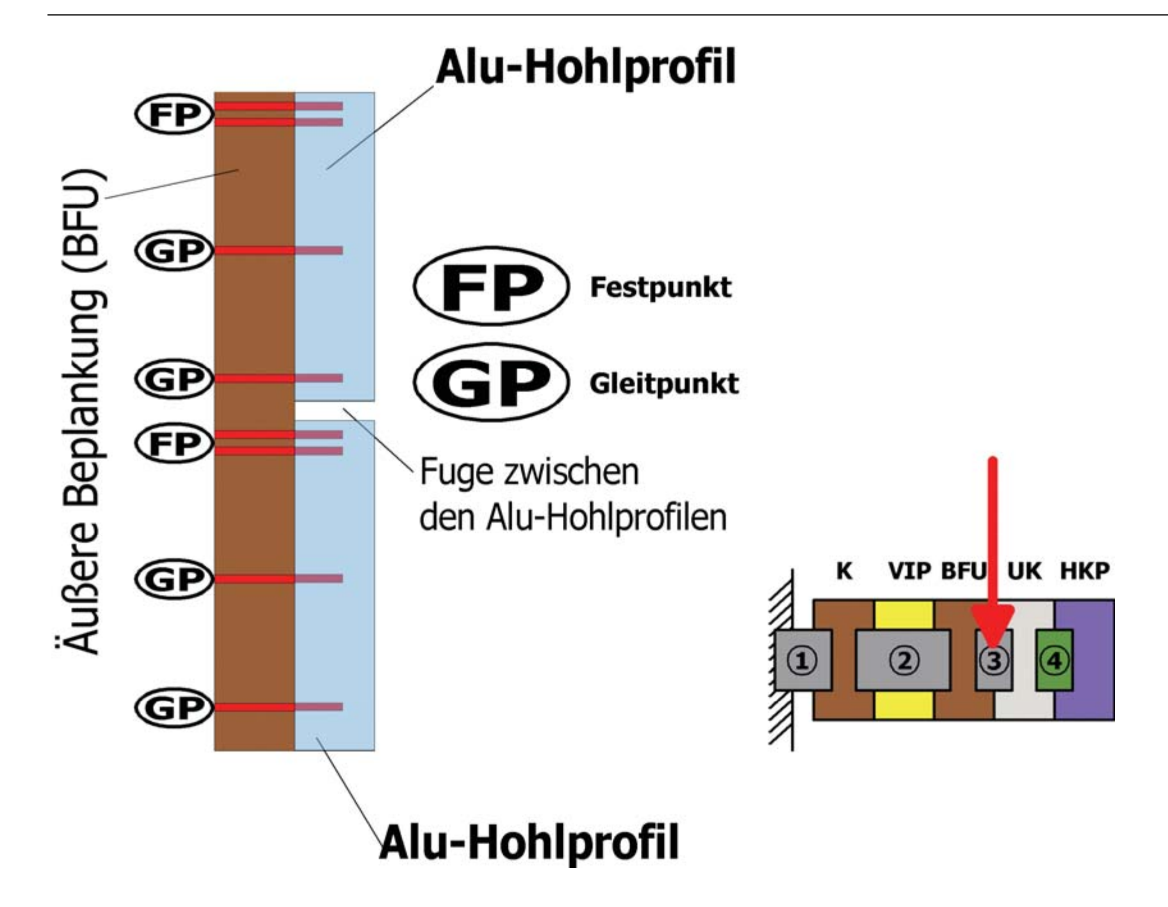


Abbildung 2.2-18 Befestigungsebene 3 (Verbindungsebene 3): Anordnung von Festpunkt (FP) und Gleitpunkt (GP) der Alu-Hohlprofile der Unterkonstruktion der Wetterschutzschale an der äußeren Beplankung sowie der Fuge zwischen den übereinander liegenden Alu-Hohlprofilen

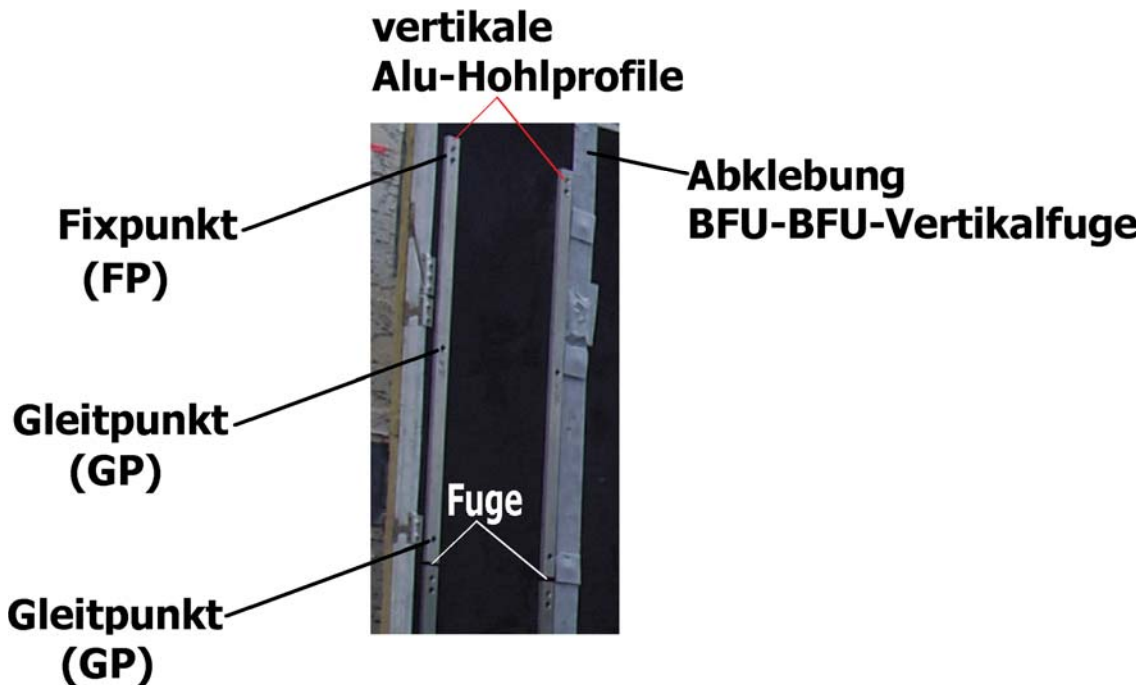


Abbildung 2.2-19 Vertikale Alu-Hohlprofile auf der äußeren Beplankung vor Applikation der Wetterschutzschale mit Festpunkt (FP) und Gleitpunkten (GP)

Sämtliche metallische Befestigungen bzw. Verbinder der Befestigungsebenen 1 - 3 und die klebetechnische Befestigung der Befestigungsebenen 4 müssen bzgl. ihrer Lage bzw. Anordnung gegeneinander innerhalb des Großelementes aufeinander abgestimmt werden. Somit ergeben sich folgende Forderungen nach „Kollisionsfreiheit“ der Befestigungselemente untereinander:

- Befestigungsebene 1 <-> Befestigungsebene 2
- Befestigungsebene 2 <-> Befestigungsebene 3
- Befestigungsebenen 2,3 <-> Befestigungsebene 4
- „Kollisionsfreiheit“ der Fugenanordnung mit den Befestigungselementen

Abbildung 2.2-20 zeigt beispielhaft an einem Ausschnitt eines GEDT 2 eine Darstellung kollisionsfreier Anordnung der Befestiger (Verbinder) der Befestigungs- bzw. Verbindungsebenen 1 - 3.

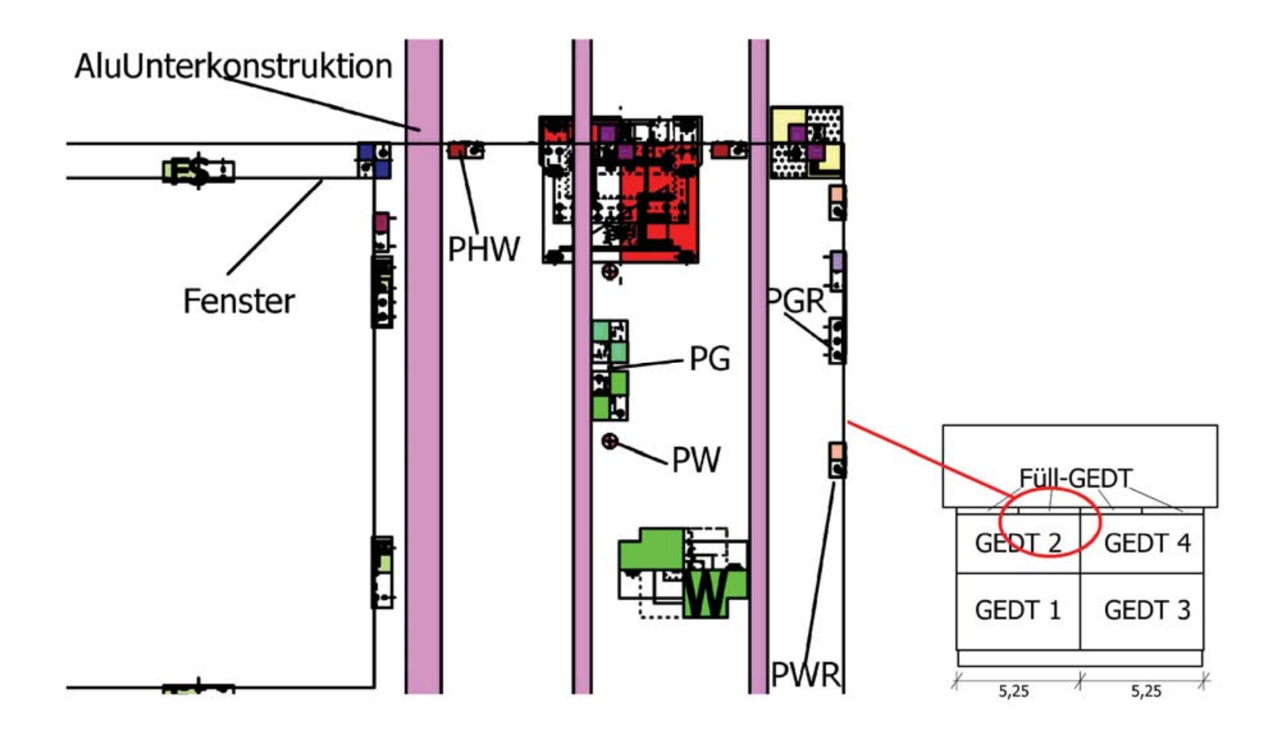


Abbildung 2.2-20 Darstellung kollisionsfreier Anordnung der Befestiger (Verbinder) der Befestigungs- bzw. Verbindungsebenen 1-3

Literaturhinweis:
Die erste öffentliche Vorstellung zu den Darlegungen im vorliegenden Abschnitt 2.2 „Entwicklung der Großelementdämmtechnik (GEDT) mit Vakuumdämmung (VIP)“ erfolgte am 10.11.2006 in [Reyer 2006], des Weiteren wurde, als ergänzte und erweiterte in [Reyer2007a] und [Reyer 2007b] berichtet. Komplettplatten (ohne VIP/mit VIP) und vergleichende Betrachtungen zwischen Komplettplatten und GEDT (ohne VIP/mit VIP) werden auch in [Reyer 2008] behandelt.
An dieser Stelle wird auch auf die Arbeiten – ebenfalls vom 10.11.2006 – in [Reuther 2006] und [Großklos 2006] hingewiesen.

2.3 Bestandserfassung, Entwurfsplanung und Genehmigung

Aufbauend auf dem Grundkonzept der Großelementdämmtechnik mit Vakuumdämmung wurden die Details der Umsetzung in Hofheim durch Beiträge aller Projektpartner erarbeitet. Eine wesentliche Rolle spielten dabei die Bestandserfassung, die Entwurfsplanung, das Genehmigungsverfahren sowie die Ausführungsplanung, die in diesem und dem folgenden Abschnitt beschrieben sind. Diese Arbeitsschritte wurden maßgeblich durch die Architekten der PlanungsgruppeDrei durchgeführt, denen auch die Gesamtleitung des Teilprojekts Großelementdämmtechnik (als Teil des gesamten Forschungsvorhabens Hofheim Wilhelmstraße) oblag.

2.3.1 Fassadenaufmaß

Die Fassade der Gebäude in der Wilhelmstraße wurden in Verbindung mit den jeweiligen innenräumlichen Bezügen (Brüstungshöhe, Fensterlaibungsausbildung, etc.) aufgemessen. Auf dieser Grundlage erfolgte die Entwurfsplanung. Für die Fertigung der GEDT-Elemente wurde ein zusätzliches Aufmaß erforderlich, mit dem die Fassade auf Lotrechte und Ebenentoleranzen untersucht wurde.
Die GEDT-Elemente werden vor der bestehenden Althauswand an einer Unterkonstruktion montiert. Die Unterkonstruktion muss so gefertigt sein, dass sie neben den statischen Anforderungen (Lastabtrag) und den Anforderungen an ihre Praxistauglichkeit bei der Montage der GEDT auch bestehende Unebenheiten in der Wandoberfläche ausgleichen kann. Der entstehende Spalt zwischen Vorderkante der Althauswand und der Rückseite der GEDT-Elemente muss mit einem dafür geeigneten Dämmstoff ausgefüllt werden, um Konvektionsströmungen zu unterbinden.
Um diese Voraussetzungen zu erfüllen, war es notwendig, die Ebenentoleranzen der Fassade zu ermitteln.

2.3.2 Statische Grundlagen, Zweischaliges Mauerwerk

Die 30 cm dicken Mauerwerk-Außenwände der drei Gebäude sind zweischalig ausgebildet. Sie bestehen aus zwei tragenden 11,5er Einzel-Wandschalen mit dazwischen liegender Luftschicht.
Das zweischalige Mauerwerk beginnt auf der massiven Kellerdecke. Innenschale und Außenschale sind durch Bindersteine punktuell miteinander verbunden. Auf Basis der Untersuchungen, die im Bereich der neuen Fensterdurchbrüche erzielt wurden, liegt diese Durchbindung bei ca. 4 - 5 Steinen je Quadratmeter. Im Deckenbereich über dem Erdgeschoss sind beide Schalen durch eine Binderlage miteinander verbunden. Das vorgefundene Steinformat ist Normalformat (b x h x l = 11,5 x 7,2 x 24 cm). Der Mörtel neigt zur Sandung.
Die Deckenbalken liegen komplett auf der Innenschale auf und sind somit im Bereich des Deckenauflagers mit dem Luftzwischenraum der beiden Mauerschalen verbunden.
Neben den Besonderheiten, die die Zweischaligkeit für die energetische Sanierung im Allgemeinen mit sich bringt, verhält sich die Lastabtragung im statischen Sinne etwas anders als bei einem monolithischen Mauerwerk.

Durch die Zweischaligkeit erhöht sich der Aufwand zur Verankerung der GEDT-Elemente in den Aufhängepunkten, den sog. „E-Befestigern". Die Verbundanker müssen unter Verwendung sog. „Meterware-Siebhülsen" durch die Vorderschale und die Luftschicht hindurch bis in die Hinterschale durchgreifen.
Statisch werden somit die Lasten aus den GEDT-Elementen in den Aufhängepunkten („E-Befestigern") wie folgt in die Althauswand eingeleitet:

- Vertikallast aus Eigengewicht wird nur in die Vorderschale eingeleitet
- Zuglasten (aus Windsog bzw. aus den sehr geringen Erdbebenlasten) werden mehr oder minder gleichmäßig in Vorder- und Hinterschale eingeleitet

Analog dazu werden die Windsoglasten bzw. die geringen Erdbebenlasten in den W-Punkten (reine Wind-Last-Verankerungen) mehr oder minder gleichmäßig in Vorder- und Hinterschale eingeleitet.

2.3.3 Dübelauszugsversuche

Zur Ermittlung der Tragfähigkeit der Mauerwerksschale wurden von der Firma Fischer Anwendungstechnik Dübelauszugsversuche vorgenommen. An allen drei Gebäuden wurden jeweils 5 Auszugsversuche an der Außenschale vorgenommen. Die Dübel wurden mit einer Prüflast von 10 KN belastet (Ende des messbaren Bereiches bei dem eingesetzten Prüfgerät). 14 Dübel haben ohne Schlupf gehalten. Ein Dübel hat bei einer Last von 8,4 KN in Folge Steinbruchs versagt.





Abbildung 2.3-1: Dübelauszugsversuche

2.3.4 Entwurfsplanung

In der Entwurfsplanung wurden grundsätzliche konstruktive wie gestalterische Kriterien für die Entwicklung der Straßenfassade festgelegt. Die unterschiedlichen Überlegungen zu den einzelnen Gesichtspunkten sind in den Kapiteln 2.4 - Ausführungsplanung genannt, da Entwurfsgedanken sich weit in den Ausführungsplanungsprozess hineinzogen.

2.3.5 Genehmigungsverfahren – Zustimmung im Einzelfall

Die baurechtliche Vorgehensweise wurde mit dem Hessischen Ministerium für Wirtschaft, Verkehr und Landesentwicklung (HMWVL) abgestimmt.

Eine Zustimmung im Einzelfall ist für nicht geregelte Bauteile nach § 19 Hessischer Bauordnung (HBO) bzw. für Bauteile notwendig, für die keine Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (A. b. Z.) durch das Deutsche Institut für Bautechnik, Berlin, vorliegt.
Unter der Bedingung, dass bei der Herstellung der GEDT-Elemente nur geregelte Bauprodukte genutzt werden, ist aus Sicht der obersten Bauaufsicht – außer für die Verwendung von Vakuum-Isolationspaneelen (s. nachfolgend) - keine Zustimmung im Einzelfall notwendig.
Bei der vorgestellten GEDT-Konstruktion ist demgemäß eine Zustimmung im Einzelfall nur für die Verwendung von Vakuum-Isolations-Paneelen (VIP) erforderlich.
Der Nachweis über den Mindest-Wärmeschutz des Gesamtelementes wurde mithilfe eines unabhängigen Gutachtens des Forschungsinstituts für Wärmeschutz e. V. München und des Herstellers der pyrogenen Kieselsäure (Porextherm) über die angesetzten Lambda-Werte der Vakuumdämmpaneele im belüfteten und evakuierten Zustand geführt.
Die Prüfung der Tragwerksplanung (Statik und Konstruktion) der GEDT-Elemente wurde von Prüfingenieur Dr.-Ing. Horst Kinkel, Neu-Isenburg, durchgeführt.
Hinweise für einen möglichen späteren Weg zur europäischen technischen Zulassung sind am Ende von Anhang IV gegeben.

2.4 Ausführungsplanung – grundsätzliche Überlegungen

2.4.1 Elementaufbau und Lastabtragung

Die Grundsätze der GEDT-Konstruktion wurden bereits im vorangehenden Abschnitt dargelegt. An dieser Stelle wird daher nur kurz auf die konkrete Umsetzung im Projekt Hofheim eingegangen.

Die gewählte GEDT-Element-Schichtenfolge (von innen nach außen) stellt sich folgendermaßen dar:

- 27 mm KERTO-Tragplatte
- 2,75 mm Schutzschicht (Sperrholz + 0,25 mm Alu)
- 40 mm VIP-Dämmung
- 2,5 mm Schutzschicht Sperrholz
- 18 mm Baufurniersperrholz (BFU)-Platte
- 20 mm Aluminium-Hohlprofil-Unterkonstruktion der Wetterschutzschale
- 8 mm Wetterschutzschale aus Harzkomposit-Fassadenplatten

Die systematische Anordnung der Befestigungspunkte der Befestigungsebene Wand-KERTO zur Weiterleitung der Lasten von der KERTO-Trag-Platte in die Althaus-Wand wurde bereits in Abbildung 2.2-7 dargestellt.

Die folgende Abbildung zeigt noch einmal beispielhaft für die gesamte linke Fassadenhälfte eine systematische Anordnung der Befestigungspunkte der Befestigungsebene KERTO-BFU zur Weiterleitung der Lasten von der BFU-Schicht durch die VIP-Schicht hindurch in die KERTO-Trag-Schicht.

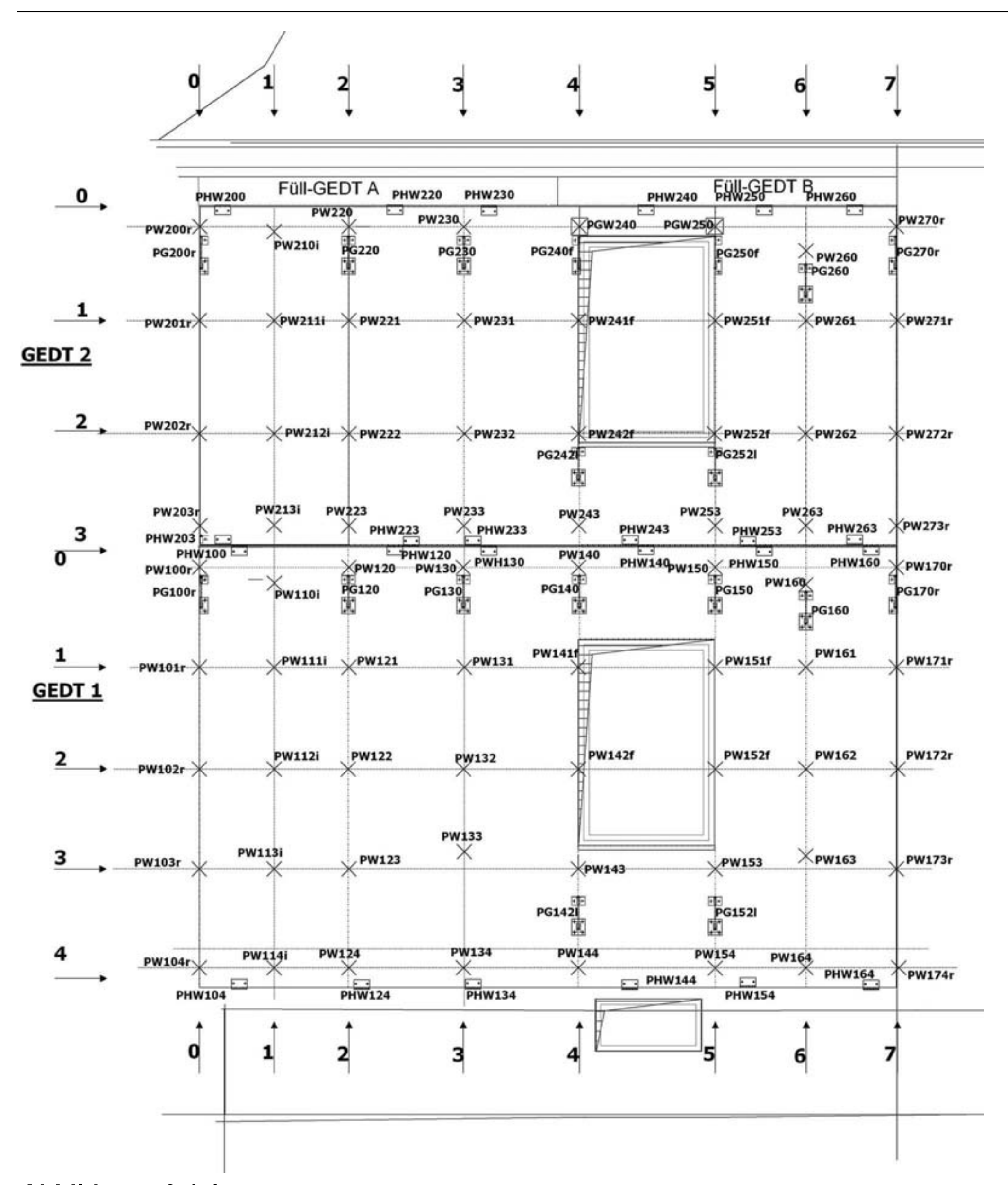


Abbildung 2.4-1: **Systematische Anordnung (linke Fassadenhälfte) der Befestigungspunkte der Befestigungsebene KERTO-BFU zur Weiterleitung der Lasten von der BFU-Schicht durch die VIP-Schicht hindurch in die KERTO-Trag-Schicht**

Im Bereich der Gebäudekante wurde aus Kostengründen entgegen der Darstellung in Abbildung 2.4-1 in der VIP-Ebene ein so genanntes „Randholz“ (Vierkant-Holz) angeordnet, das über handelsübliche Schraubtechnik (hier Spanplatten-Schrauben) mit KERTO- und BFU-Platte verbunden wird. Diese Verbindung ermöglicht die Übertragung der in diesem Bereich auftretenden Lasten aus Eigengewicht, Wind und Erdbeben und kann die kostenintensiveren Edelstahl-Verbindungen zwischen KERTO und BFU in diesem Bereich ersetzen. Die Straßenfassade ragt seitlich über die WDVS-Fassade. Dadurch kommt es zu keiner Verschlechterung des Wärmebrückenkoeffizienten (siehe Kapitel 2.6.7.2).

2.4.2 GEDT-Einteilung

Die Bestand-Fassade ist im Prinzip axial-symmetrisch zur vertikalen Mittelachse des Gebäudes aufgebaut. Die GEDT-Element-Einteilung wurde ebenfalls axial-symmetrisch zur vertikalen Mittelachse der Althaus-Wand gewählt.
Die für den Betrachter sichtbare Fassadenoberfläche (Wetterschutzschale) wird aus montage- bzw. transporttechnischen Gründen und wegen der Möglichkeit der geschlossenen Ausrichtbarkeit vor Ort nach der Montage der GEDT-Elemente montiert. Dadurch ergibt sich eine weitgehende Freiheit in der optischen Gestaltung (z. B. bzgl. Abmessung und Fugenbild) der Wetterschale (als eigentliche Fassadenoberfläche).

Die gewählten Abmessungen der GEDT-Elemente werden zum einen durch Restriktionen aus der vorhandenen Gebäudegeometrie und den verfügbaren Transportkapazitäten (Transport per LKW über die Straße – auch in Zusammenhang mit der StVO) bestimmt, zum anderen durch die Standard-Abmessungen der verwendeten Holzwerkstoffplatten.

Zu Beginn der Entwurfsplanung wurde die Überdämmung des straßenseitigen Sockels mit GEDT geplant. Im späteren Planungsstand wurde aus gestalterischen und transporttechnischen Gründen davon abgewichen. Der Gebäudesockel wurde umlaufend in einer Höhe geplant und auch straßenseitig als WDVS ausgebildet. Folgende prinzipielle Varianten zur Anordnung der GE-GE-Fugen an der Althaus-Fassade wurden diskutiert:

Variante 1:
Die Fassadenfläche wird durch möglichst wenige Fugen und eine geringe Fugenlänge unterbrochen. Die Elemente sind gleich bzw. gespiegelt gleich.

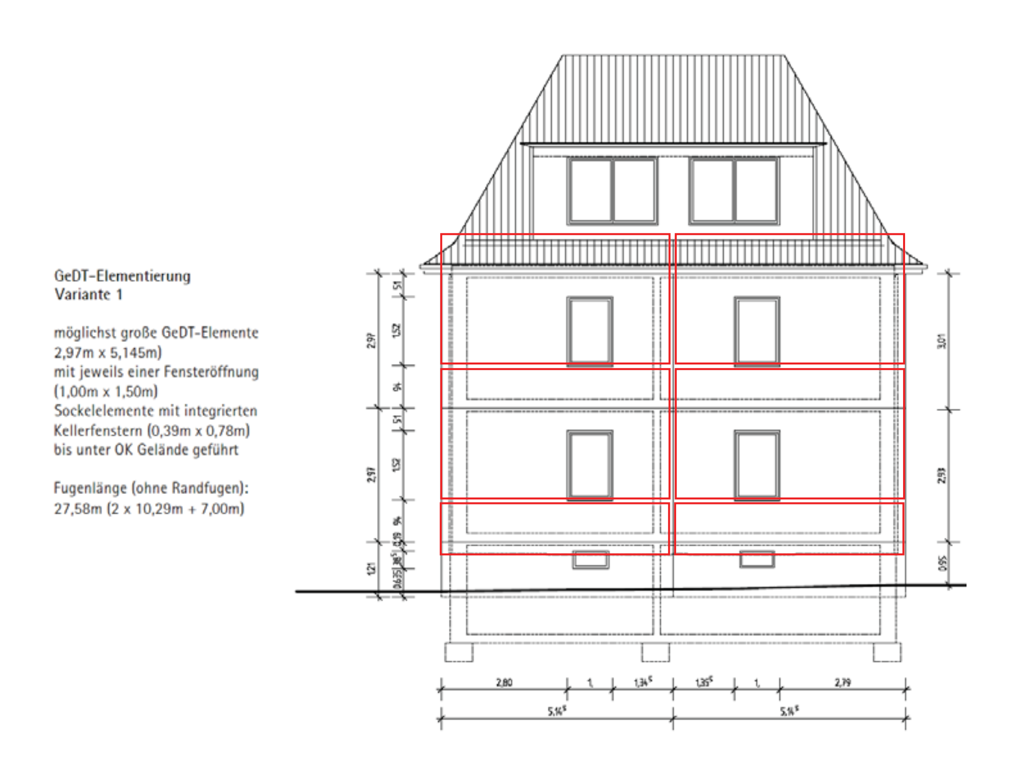


Abbildung 2.4-2: GEDT-Einteilung – Variante 1

Variante 2:
Die GEDT-Elemente mit Fensteröffnung werden alle mit gleichen Abmessungen ausgebildet. Passstücke zwischen den GEDT-Elementen mit Fensteröffnung gewährleisten deren Anpassung an die Fensteröffnungen im Bestand. Randstücke schließen außen an das WDVS an. Der Fugenanteil ist durch die hohe Anzahl an Elementen groß. Die Trennung zwischen Elementen mit Fensteröffnung und ohne erzeugt weitgehende Flexibilität auf der Baustelle.

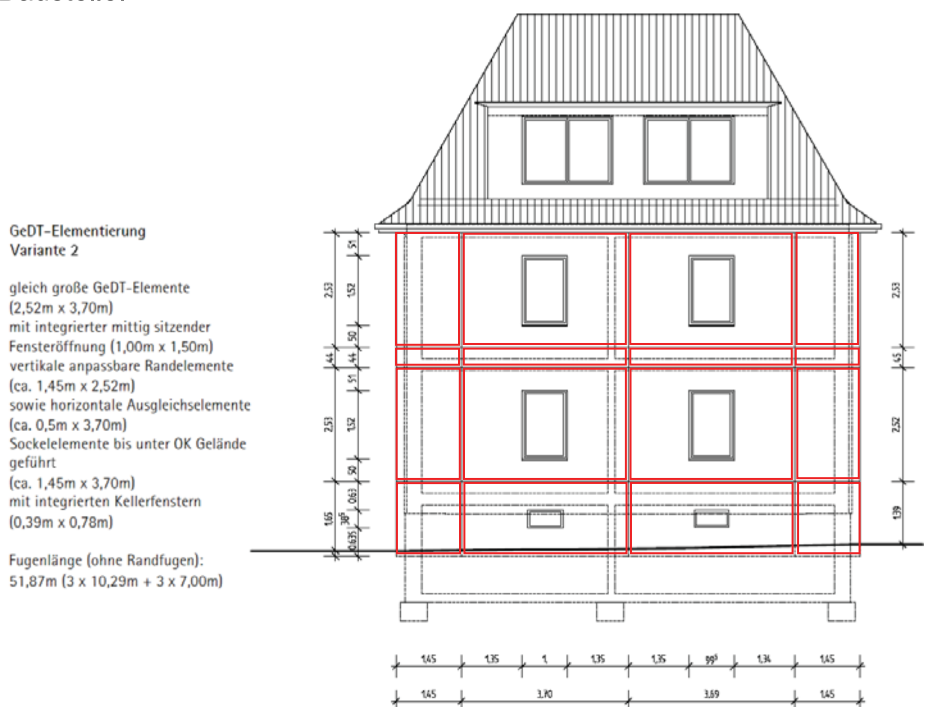


Abbildung 2.4-3: GEDT-Einteilung – Variante 2

Variante 3:
Horizontale Fugen werden, wenn möglich, vermieden. Die Anzahl der Elemente soll gering gehalten werden.
Die Lage der Sockelschiene zur Abtragung der Vertikalkräfte wurde außerhalb des beheizten Bereiches vorgesehen. Dadurch kann die vertikale Lastabtragung der gesamten Fassade (einschl. Verkleidung) weitgehend ohne Wärmebrücke erfolgen. Die GEDT-Elemente mit Fensteröffnung werden gleich ausgebildet. Die Anpassbarkeit der Elemente an den Bestand ist durch Zusammenfassung dreier Fenster in einem Element gering.

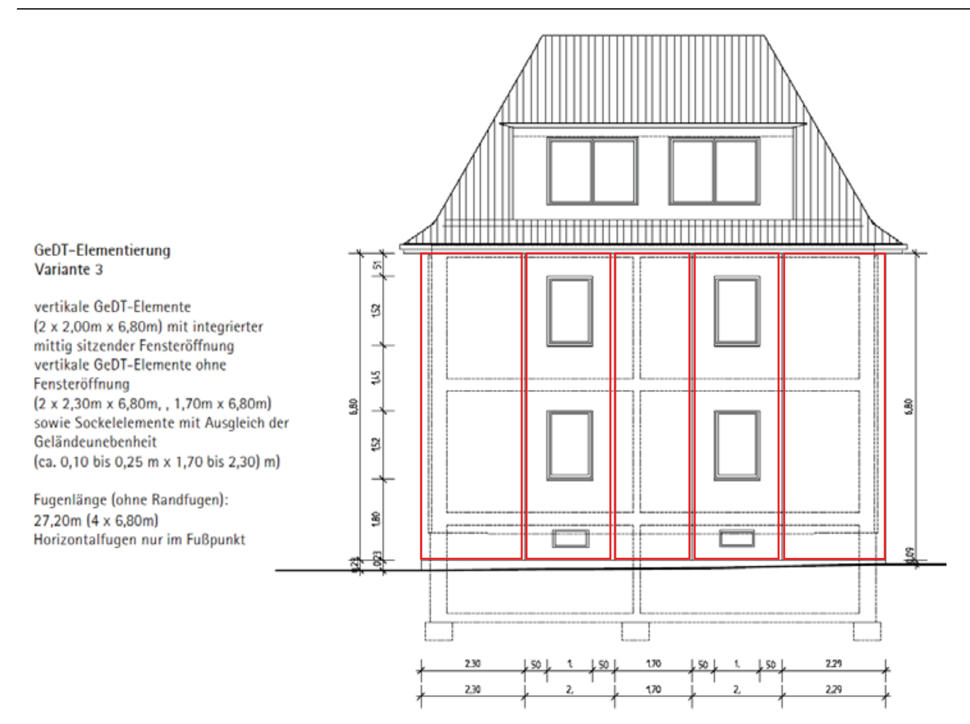


Abbildung 2.4-4: GEDT-Einteilung – Variante 3

Aufgrund der geringen Elementanzahl, der geringen Fugenlängen und der Handhabung während der Montage auf der Baustelle wurde Variante 1 bevorzugt.

2.4.3 Fugenausbildung

2.4.3.1 Fuge zwischen den GEDT-Elementen (GE-GE-Fugen)

Bei der Einteilung der GEDT-Elemente wurde darauf geachtet, die Fugenlängen zwischen den einzelnen Groß-Elementen (GE) zu minimieren, um fugenbedingte Wärmebrücken (und damit letztlich den längenbezogenen Wärmebrückenaufschlag) zu minimieren.

Aus montagetechnischen Gründen wurde die GEDT-Fugen-Breite mit 10 mm (-5 mm/+5 mm) geplant.

Die einzelnen GEDT-Elemente werden an der Stirnseite umlaufend mit einem Butylband abgeklebt. Bei der Montage werden die vertikalen und horizontalen Stöße in kompletter Tiefe mit einem 90 mm breiten vorkomprimierten Dichtband versehen und außenseitig mit einem Butylvlies abgeklebt. Bauseits wird nach Montage der Elemente die GE-GE-Fuge mit einem dampfdiffusionsoffenen Klebeband aus Butylvlies zum Schutz der vorkomprimierten Dichtbänder abgeklebt.

Abbildung 2.4-5 zeigt einen Horizontalschnitt durch eine vertikale GE-GE-Fuge mit planmäßiger Fugen-Breite von 10 mm.

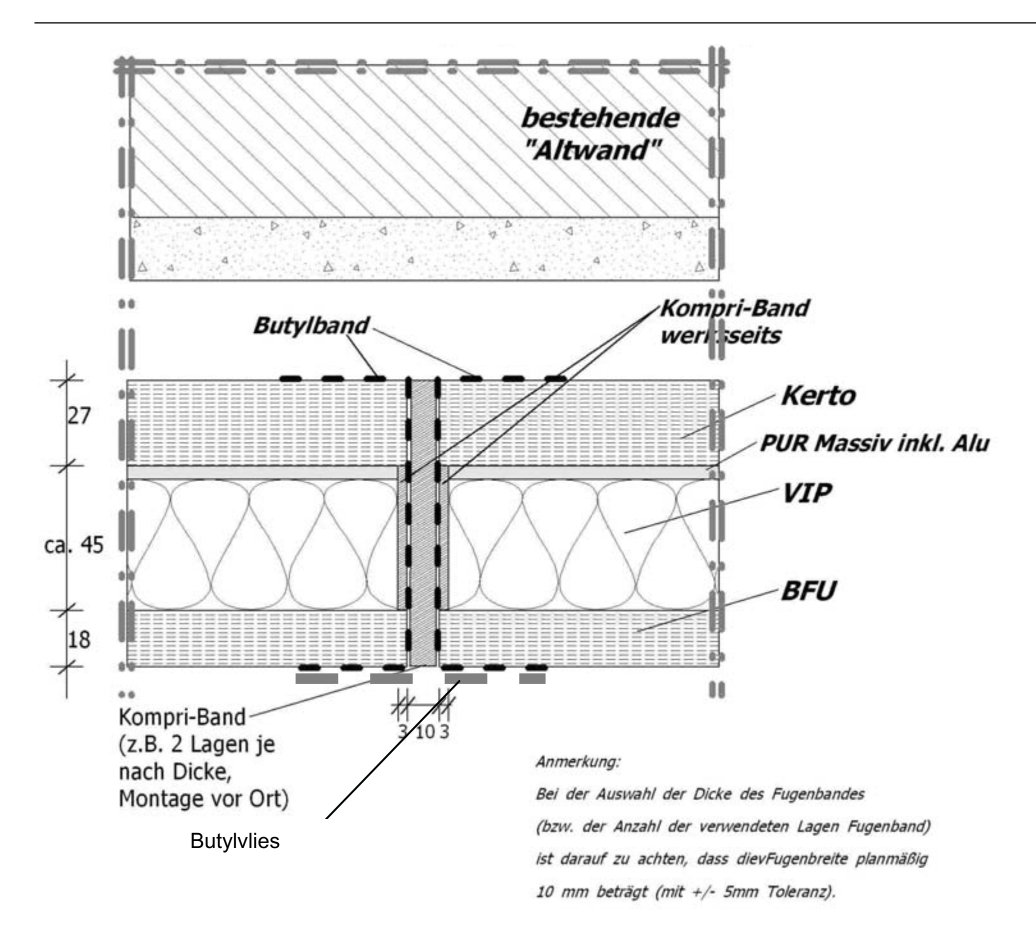


Abbildung 2.4-5: Horizontalschnitt durch eine vertikale GE-GE-Fuge mit planmäßiger GEDT-Fugen-Breite von 10 mm[1]

Die notwendigen statischen Randbefestigungen zur Verbindung der vorderen und hinteren GEDT-Schale sind um Materialstärke in die Kerto- bzw. BFU-Platte eingelassen, um besser mit dem Butylband abgeklebt werden zu können. An den GEDT-Stößen wurden diese Metallteile zusätzlich versetzt, um Wärmebrücken zu minimieren und Kollisionen unter den GEDT-Elementen zu vermeiden.

2.4.3.2 Fuge zwischen den VIP

Die Abmessungen der einzelnen VIP innerhalb der jeweiligen GEDT-Elemente stehen in engem Zusammenhang mit der Anordnung der statisch erforderlichen punktuellen (Edelstahl-)Durchdringungen (PW, PG, etc.) der VIP-Dämmung und produktionstechnischen Restriktionen der BFU-Platte. Die punktuellen (Edelstahl-)Durchdringungen geben im ausgeführten Fall eine Art vertikales Raster vor, das die Breite der einzelnen VIP bestimmt.

Die einzelnen VIP werden eng gestoßen. Im Fugenbereich der VIP-VIP-Fugen wird ein dünnes vorkomprimiertes Fugenband angeordnet, um die herstellungsbedingten Größenunterschiede der VIPs auszugleichen.
Wie bei den GE-GE-Fugen war auch bei den VIP-VIP-Fugen die Minimierung der Fugenlänge oberstes Ziel.

[1] Die in der Planungsphase noch diskutierte „PUR Massiv“-Schutzschicht wurde später durch dünnere beidseitige Sperrholzschichten ersetzt (s. Kap. 2.4.1)

2.4.4 Fensterintegration

Neben der Wand spielt das Fenster eine entscheidende Rolle für die Energieeffizienz des Gebäudes. Für die speziellen Umstände der geplanten Sanierung ist sowohl das Fenster als auch der Anschluss an die GEDT zu optimieren. Wesentliche Kriterien der Fensterintegration sind im Folgenden genannt:

Energetische Kennwerte

- Fenster und Eigenschaften des Glases: U_W / U_f, U_g, Ψ_g; g / τ_v
- Wärmebrücken im Anschlussbereich seitlich, oben unten: $\Psi_{oben, unten, seitlich}$
- Tauwasser- und Schimmelpilzbildung: Temperaturfaktor f_{Rsi}

Mechanische Belastungen

- Eigengewicht des Fensters
- Windeinwirkung Sog/Druck
- Kräfte aus der Bedienung (offener Flügel, Zusatzlast an offenem Flügel)

Zusätzliche Anforderungen

- Bewegungsausgleich zwischen Fenster und Dämmpaneel
- Schlagregendichtheit und kontrollierte Wasserableitung aus den Profilen
- Schallschutz
- Bedienbarkeit, Nutzungssicherheit, Reparaturfähigkeit
- Zusatzfunktionen wie integrierte Lüfter, Antriebe usw.

Konstruktive Ausbildung

- Elemente zur Befestigung und Lastabtragung
- Raumseitige Dichtebene
- Dämmung der Anschlussfuge
- Äußere Dichtebene und Elemente zur Wasserführung
- Elemente zur Verkleidung der Anschlussbereiche
- Ggf. Anpassung des Fenstersystems

Diese Punkte galt es für die konkrete Umsetzung an den Objekten in Hofheim aber auch verallgemeinerbar für kommende Bauvorhaben zu beschreiben. Die PlanungsgruppeDREI hat schwerpunktmäßig die Details für die konkrete Umsetzung für die Sanierung in Hofheim in Zusammenarbeit mit dem ift Rosenheim entwickelt. Für die energetische Auslegung der Fenster und deren Anschlüsse wurden die Berechnungen des IWU verwendet.
Das ift Rosenheim hat die grundsätzlichen Überlegungen zur Integration der Fenster ausgearbeitet und in Anhang IV zusammengestellt.

2.4.4.1 Lage

Zur grundsätzlichen Abklärung der optimalen Einbaulage des Fensters in das GEDT-Element wurden durch das IWU Berechnungen durchgeführt (siehe Kapitel 2.4.8.1).
Hierbei wurde festgestellt, dass der Einbau der Fenster versetzt zur Dämmebene (in die Wandebene) beim Einsatz von GEDT-Elementen nicht zu empfehlen ist, da die Wärmebrückeneffekte einen sehr großen Einfluss erlangen. Es sollte möglichst eine Anordnung des Fensters mittig über dem VIP angestrebt werden.

Diese Forderung deckt sich mit der Anforderung an das GEDT-Element im Montagezustand. Um Kollisionen und Beschädigungen am GEDT-Element zu vermeiden, wird auf überstehende Elemente weitgehend verzichtet.
Für die Montage des Fensters in der VIP-Ebene wurde eine geeignete Befestigung am Dämmelement, aber auch des Dämmelements im Bereich der Wandöffnung notwendig.

2.4.4.2 Konzeption

Zu Beginn wurden die gängigen Rahmenmaterialien Kunststoff, Holz, Holz-Metall-Verbund und Metall untersucht. Es bestehen grundsätzlich keine Einschränkungen in Bezug auf die möglichen Rahmenmaterialien der vorzusehenden Fenster. Wesentliche Hinweise zu den Eigenheiten der verschiedenen Fenstersysteme sind in der Anlage IV zu diesem Bericht enthalten.

Für die durchzuführende Sanierung mit hohen Anforderungen bzgl. Wärmeschutz kommen allerdings nur Fenster mit einem niedrigen U-Wert (insbesondere auch niedrigem U_f–Wert des Rahmens) in Frage. Dies kann für die vorhandenen Anforderungen in der Regel nur durch große Profildicken und/oder die Verwendung von zusätzlichen Dämmstoffen im Profil bewerkstelligt werden. Die sich ergebenden Profildicken des Blendrahmens sind dabei größer als der eigentliche Dämmpaneelaufbau. Bei den eingesetzten Holz-Fenstern des Projektpartners Variotec handelt es sich um passivhaustaugliche Bauteile mit einem sehr niedrigen U-Wert (ca. 0,7 W/(m²K)). Die Bautiefe ist mit nur 11 cm sehr gering, jedoch immer noch etwas größer als der gewählte GEDT-Aufbau ohne Fassadenbekleidung. Durch die zusätzlich eingefügte Aluminiumdeckschale des Rahmens lässt sich aber die übrige Fassadenbekleidung passgenau durch Einschieben eines Fugenbleches zwischen Holzfenster-Oberkante und Aluminiumdeckschale anfügen. Raumseitig steht der Flügelrahmen mit der Dicke des Flügelüberschlags (je nach Fenstersystem 16 bis 22 mm) über die Ebene des Dämmpaneels vor. Die Dicke des Gesamtaufbaus muss sich somit neben den funktionalen und konstruktiven Aspekten des Dämmpaneels auch nach den Erfordernissen der Rahmenprofiltechnik richten. Die Lastabtragung des Fensters erfolgt im inneren Fünftel des Rahmens, so dass eine Befestigung wärmebrückentechnisch günstig in Kerto-Platten-Achse erfolgen kann.

2.4.4.3 Anschlussausbildung

Mit der Erfüllung der bauphysikalischen Anforderungen an den Anschlussbereich sind wesentliche Voraussetzungen geschaffen,

- die dem Nutzer ein angenehmes und gesundes Raumklima ermöglichen,
- die Baukonstruktion vor klimabedingten Schäden schützen und
- den Energieverbrauch mindern.

Unabhängig von der gewählten Fensterkonstruktion und Positionierung des Fensters müssen die bauphysikalisch erforderlichen Abdichtungsmaßnahmen

- am Übergang der Fensteröffnung der Wand zur GEDT
- am Übergang des Fensters zur GEDT

vorgesehen werden. Für die Festlegung der Dichtebenen hat sich die Betrachtung in Form des so genannten „Ebenenmodells“ bewährt. Dabei werden Außenwände und Bauteile in die Funktionsebenen eingeteilt. Die grundsätzlichen bauphysikalischen Anforderungen werden in zwei getrennten Funktionsebenen erfüllt, die Funktionen im dazwischen liegenden Bereich

zusammengefasst und in technische Eigenschaften und Details umgesetzt. Diese einzelnen Ebenen und der Bereich müssen in der Konstruktion klar definiert und ausführbar sein.

Ebene 1

Trennung von Raum- und Außenklima (Luftdichtheitsebene)

Diese Trennung muss in einer Ebene erfolgen, deren Temperatur über der für das Schimmelpilzwachstum kritischen Temperatur (80 % Luftfeuchte-Kriterium) des Raumklimas liegt. Die Ebene muss über die gesamte Fläche der Außenwand erkennbar sein und darf nicht unterbrochen werden.

Ausgehend von einem Raumklima von z. B. 20 °C, 50 % rel. Luftfeuchte, muss die Trennung in Bereichen über 12,6 °C liegen. Damit wird unter den angenommenen Bedingungen, die gemäß DIN 4108-2 für den Nachweis der Einhaltung des Mindestwärmeschutzes im Bereich von Wärmebrücken im Regelfall zugrunde zu legen sind, Tauwasser an der raumseitigen Oberfläche vermieden und das Risiko der Schimmelbildung minimiert.

Der Luftdurchgang durch die Fuge Dämmpaneel-Fenster muss aus Gründen der Minimierung von Wärmeverlusten (Lüftungswärmeverluste) und zur Vermeidung von Tauwasser in den Konstruktionen ausgeschlossen werden.

Der Luftdurchgang zwischen Paneel und Wand muss aus Gründen der Schalldämmung und zur Minimierung von Konvektion ausgeschlossen werden.

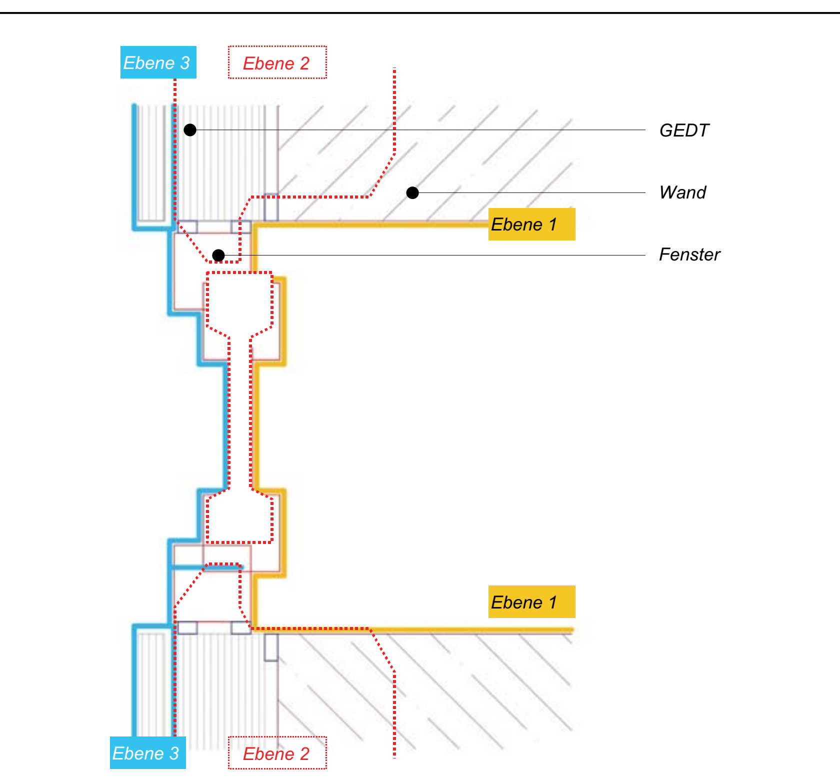
Ebene 3

Wetterschutz

Die Ebene des Wetterschutzes verhindert weitgehend den Eintritt von Regenwasser (Schlagregen) von der Außenseite. Eingedrungenes Regenwasser muss kontrolliert und direkt nach außen abgeführt werden. Zugleich muss die Feuchtigkeit aus dem Funktionsbereich nach außen entweichen können.

Daraus ergibt sich die Auffächerung der Ebene des Wetterschutzes, die bewährten Grundelementen, z. B. einer Dacheindeckung nachempfunden ist.

Je nach Ausbildung der äußeren Fassadenbekleidung kann die Ebene einstufig (z. B. bei Putz) oder mehrstufig (z. B. hinterlüftete Blechkonstruktion) sein.



Ebene/Bereich 2

Funktionsbereich

In diesem Bereich werden insbesondere die Eigenschaften Wärme- und Schallschutz über einen wirtschaftlich angemessenen Zeitraum (siehe auch Bauproduktengesetz § 5 Brauchbarkeit) sichergestellt. Bei geschlossenen Systemen (z. B. Mehrscheiben-Isolierglas, Sandwich-Paneele) ist der Falzbereich und bei offenen Systemen (z. B. Verbundfenster und Kaltfassaden) das gesamte System über den Wetterschutz mit dem Außenklima zu verbinden. Allgemein formuliert heißt dies, der Funktionsbereich muss „trocken bleiben“ und vom Raumklima getrennt sein. Der Funktionsbereich erstreckt sich auf das Dämmpaneel, Fenster und Außenwand gleichermaßen.

Abbildung 2.4-6: Ebenenmodell mit Beschreibung

2.4.4.4 Revisionierbarkeit der Fenster

Für die Fenster können Nutzungszeiträume zwischen 20 und 40 Jahren angesetzt werden. Dabei sind in regelmäßigen Abständen Wartungs- und Pflegemaßnahmen insbesondere an Dichtungen, Fugen und Beschlägen vorzunehmen. Diese Arbeiten können bei der geplanten Einbaulage vorgenommen werden, je nach verwendetem Beschlagsystem müssen ggf. maßliche Veränderungen an der Überdeckung der Laibungsverkleidung vorgenommen werden.

Bei außerplanmäßigen Belastungen, z. B. bei unkontrolliertem Aufschlagen des Flügels auf ein Hindernis im Falz (beispielsweise einem Keil), kann es zu weitergehenden Beschädigungen von Beschlägen und Rahmenprofilen kommen. Ein vollständiger Austausch des Flügelrahmens ist dabei selten, ist aber machbar, ein Ersatz des Blendrahmens mit den dazugehörigen Eingriffen in die Laibung und Dämmelement ist möglich. Der Ablauf beim Austausch des kompletten Fensters wäre folgendermaßen:

Der Austausch erfolgt von innen, entsprechend einer üblichen Einbausituation im Massivbau mit Mauerwerks-Anschlag nach folgendem Ablauf:

- Entfernung der Aluminium-Deckschale des Holzfensters
- Lösen der 3-seitigen Verschraubung zwischen Aluminium-Fensterumrandung und Fenster
- Entfernung der 3-seitigen Fenster-Laibungsbekleidung innen
- Entfernung der Fensterbank
- Lösen der Verschraubung zwischen Fensterlasche und Wandlasche am F-Punkt (übrige Fensterpunkte dazu analog)
- Herausheben des Fensters
- Der Einbau erfolgt analog.

2.4.5 Sonnenschutz/Verdunklung

Für die Lage des Sonnenschutzes bieten sich folgende Möglichkeiten:

- Außen liegend (vor der Fensterebene/Fassade)
- In der äußeren Glasebene
- Innen liegend

Flächenbündigkeit, außen liegend

Bei der Einbausituation auf der Nordfassade (Sonnenschutz nicht nötig) wird von einem außen liegenden Sonnenschutz abgesehen. Die Lage des Fensters in Dämmebene würde ansonsten dazu führen, dass der Verdunklungsschutz vor der Fassade angebracht werden müsste. Ein innen liegender Sonnenschutz ist daher sowohl aus ästhetischen wie konstruktiven Gründen vorzuziehen.

Verschattung in der äußeren Glasebene

Verdunklungssysteme im Glaszwischenraum haben den Vorteil, vor Witterungseinflüssen geschützt zu sein. Durch ihre Anordnung benötigen sie nicht wie andere Systeme Raum im Außen- bzw. Innenbereich des Fensters. Aufgrund der räumlichen Gegebenheiten

(vorhandener Hohlraum des ehemaligen Rollladenkastens) ist dieser aber ausreichend vorhanden.

Innen liegende Verdunklung
In der Wilhelmstraße kommt die Vakuumdämmung nur auf der Nordfassade zum Einsatz. Durch das Fehlen der direkten Sonneneinstrahlung ist ein außen liegender Sonnenschutz nicht notwendig.
Die Verdunklung der straßenseitigen Räume erfolgt daher raumseitig mit Horizontallamellen bzw. Jalousien.
Hierzu wird der vorhandene Hohlraum des ehemaligen Rollladenkastens genutzt. Die sich aus der Lage des Fensters in der Dämmebene ergebenden großen Laibungstiefen sind in Bezug auf die Luftzirkulation und damit auf den Transport von Wärmeenergie ungünstig. Um Tauwasserbildung am Fenster (trotz 3-Scheiben-Wärmeschutzverglasung) zu vermeiden, wird darauf geachtet, dass die innen liegende Verdunklung nicht dicht schließend ausgeführt wird.

2.4.6 Fassadenbekleidung

Die Fassadenbekleidung dient im vorliegenden Falle unter anderem dazu, die über die BFU-Ebene herausragenden statischen Verbindungsmittel, die nicht witterungsbeständigen BFU-Platten und die Elementfugen vor Witterungsseinflüssen zu schützen.
Grundsätzlich lassen sich flächige und elementierte Fassadenbekleidungen unterscheiden.
Bei den flächigen Fassadenbekleidungen wurde beispielhaft die Einsatzmöglichkeit einer Putzfassade untersucht.
Elementierte Bekleidungen werden über eine Unterkonstruktion an der äußeren GEDT-Fläche, der BFU-Platte befestigt. So kann der ggf. notwendige „Ausgleich“ von „Höhendifferenzen“ einzelner GEDT-Elemente durch die Unterkonstruktion zur Realisierung einer ebenen Fassadenoberfläche erfolgen.
Die u. a. aufgrund der Gliederung der Altfassade in einem unregelmäßigen Raster angeordneten statischen Verbindungsmittel erlauben keine regelmäßige Anordnung der Unterkonstruktion. Dadurch erfolgt die Befestigung der Fassade in nicht sichtbarer Weise.

Putz
Bei der Herstellung einer Putzfassade auf den GEDT-Elementen müssten mehrere Faktoren bedacht werden:
Die BFU-Oberfläche wäre als Putzträger nicht geeignet und könnte daher nicht direkt überputzt werden. Zudem müssten die über die BFU-Platte ragenden Stahlbefestigungen der Befestigungsebene KERTO-BFU überbrückt werden, um eine ebene Fläche zu erhalten. Hierzu wäre die gesamte Fläche mit einer Putzträgerplatte zu versehen. Überstehende Stahlteile wären mit einer darunter liegenden Ausgleichslage zu versehen.
Die GE-GE-Fugen sind Elementfugen und könnten nicht dauerhaft „riss-sicher“ überbrückt werden. Zum Verschluss der Elementfugen eigneten sich vorkomprimierte Dichtbänder, die in der Lage sind ,die – wenn auch nur geringfügigen – zu erwartenden Längenänderungen (z. B. aus Temperatur- bzw. Feuchteänderungen) aufzunehmen.
Eine Kombination von flexiblen Fugen mit Putzoberfläche ließe sich gestalterisch nur schwierig lösen, da Elementfugen gleichzeitig Gestaltungsfugen wären. Zudem wäre die Fuge nicht vor direkten Witterungseinflüssen zu schützen.

Elementierte Fassadenbekleidung

Die im Folgenden genannten elementierten Bekleidungen werden auf linienförmigen Unterkonstruktionen montiert. Zur Vermeidung von Beschädigungen der VIP (durch eine Verschraubung der Unterkonstruktionsprofile vor Ort von der Wetterschalenseite aus), werden die Unterkonstruktionsprofile vor Ort über selbstsichernde Muttern an werkseitig von der VIP-zugewandten Seite durchgesteckte, an Anschweißmuttern gegen Mitdrehen angepunktete Gewindestangen befestigt. An der VIP-zugewandten Seite werden diese Anschweißmuttern noch mit einer 1 mm dicken Schutzschicht (PUR-Spachtel) überzogen.

Abbildung 2.4-7 zeigt einen Horizontalschnitt durch die BFU-Platte und ein vertikales Alu-Profil (50x20x2 mm) der Unterkonstruktion.

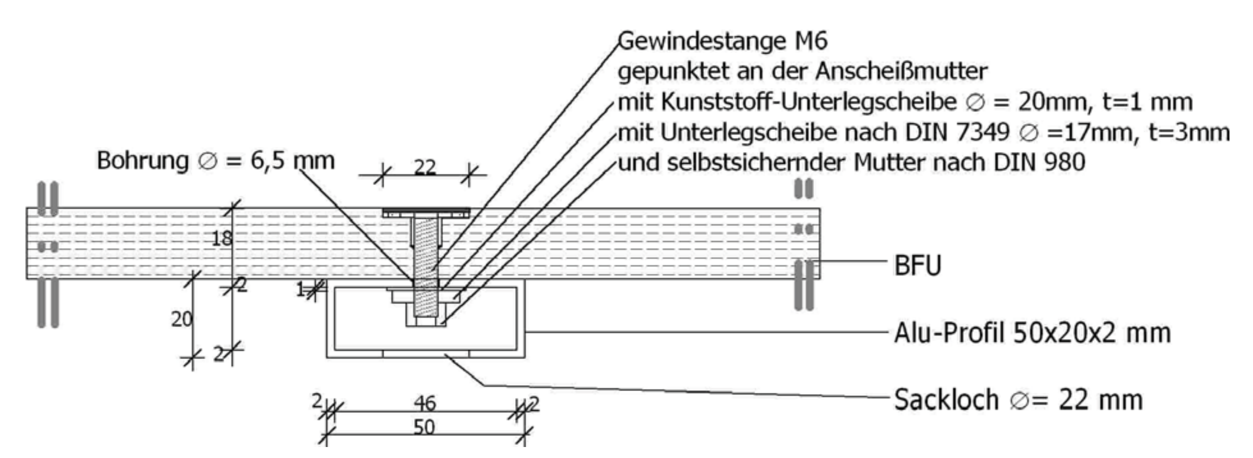


Abbildung 2.4-7: Horizontalschnitt durch die BFU-Platte und ein vertikales Alu-Profil (50x20x2 mm) der Unterkonstruktion

Fassadenplatten aus Faserzement, Harzkomposit

Harzkomposit-Fassadenplatten bzw. Faserzement-Fassadenplatten bieten vielfältige Gestaltungsmöglichkeiten. Sie sind langlebig und lassen sich durch ihre Farbvielfalt sehr gut mit dem weiteren farblichen Gebäudekonzept abstimmen.

Als besonders sinnvoll erweist sich die vielfältige Befestigungsmöglichkeit dieser Fassadenbekleidung.

Zur Verfügung stehen die sichtbare Befestigung auf horizontaler bzw. vertikaler Unterkonstruktion durch

- Blindnieten,
- Verschrauben,

die nichtsichtbare Befestigung auf horizontaler Unterkonstruktion durch

- Agraffen

sowie die nichtsichtbare Befestigung auf horizontaler bzw. vertikaler Unterkonstruktion durch

- Verkleben mit „SIKA Tack Panel“ . Hierbei handelt es sich um einen elastischen Bau-Klebstoff auf Basis elastomerer Kunststoffe für die verdeckte und spannungsfreie Montage von Fassadenplatten.

Bei der Befestigung der Wetterschutzschale kommt der Minimierung der Aufbauhöhe eine entscheidende Bedeutung zu (s. hierzu Punkt 3 Projektbeschreibung). Aus diesem Grund wurde die Befestigung durch Verkleben gewählt. Die vertikal verlaufende Unterkonstruktion gewährleistet die Hinterlüftung der Fassade und dient sogleich der Lastabtragung. Der minimal erforderliche Hinterlüftungsraum von 2 cm wird eingehalten.

Glas/Kunststoff/Kunststoff-Stegplatten
Weitere für die Fassadengestaltung verwendete Materialien wurden auf ihre Eignung bei diesem Bauvorhaben überprüft. Hierzu gehören unter anderem Materialien, die das neuartige Dämmmaterial „Vakuum-Isolationspaneel“ durch ihre Ästhetik und Oberflächenbeschaffenheit sehr gut zur Geltung bringen würden, bei dieser Bauaufgabe aber unpassend erscheinen, da sowohl im Kontext mit der Nachbarbebauung als auch der Gesamterscheinung der drei zu sanierenden Stadthäuser die neue Fassade als Fremdkörper wirken würden.

Metall (Alucobond, lackiertes Blech)
Metall, im betrachteten Fall der Werkstoff „Alucobond“, eine ca. 4 mm dicke Sandwichplatte mit Metalloberfläche zeigt ähnliche Vorteile der Gestaltung wie Fassadenplatten aus Faserzement und Harzkomposit mit dem Zusatz, dass sich diese Platten auf der Kantbank formen lassen und somit sämtliche Anschlüsse im Bereich der Fenster, der Fassadeecken sowie im Bereich der Traufe sehr gut und ohne winklige Plattenstöße herstellen lassen. Der Nachteil liegt in der eingeschränkten Befestigungsmöglichkeit, da für Alucobond bisher keine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für die nicht sichtbare Befestigung durch Verklebung vorliegt.

Holz/Naturstein
Die Bekleidung der Fassade mit Holz- oder Natursteinplatten ist grundsätzlich möglich, wegen ihrer gegensätzlichen assoziativen Belegung (Natur, Gewicht, Massivität, etc.) wurde dies aber bei diesem Projekt nicht in Erwägung gezogen.

2.4.7 Integration der GEDT-Entwicklung in den Modernisierungsprozess

Integration lässt sich in die Unterbereiche gliedern

- Gestaltung (s. hierzu 2.4.6 Fassadenbekleidung)
- Konstruktion, Fügung (s. hierzu 2.4.7.2 Notwendige Anpassungen)
- Zeitplanung

2.4.7.1 Zeitplanung

Die Sanierung wurde so geplant, dass die Errichtung der straßenseitigen Fassade in engem zeitlichen Zusammenhang mit der energetischen Sanierung im Allgemeinen steht, da es bei der Ausführung der Anschlussdetails zu einer Verschneidung der beiden Teilprojekte kommt. Nach der Erstellung der 3-seitigen WDVS-Fassade und des Walmdaches mit Kastengesims war die Errichtung der Straßenfassade vorgesehen. Innerhalb der Häuser wurden die Sanierungsarbeiten so terminiert, dass Arbeiten an der Innenwand der Straßenfassade (innere Fenster-Laibungen) zuletzt erstellt werden.

Während der Ausführungsplanung an der straßenseitigen Fassade zeigte sich, dass eine Errichtung im Zeitraum der energetischen Sanierung nicht realisierbar war. Die Detailausbildung in den außen liegenden Anschlussbereichen (s. 2.4.7.2 Notwendige Anpassungen) wurde im Vorfeld aber derart gewählt, dass auch eine zeitliche Trennung ausführbar wurde.

2.4.7.2 Notwendige Anpassungen

Die mögliche Ausführung der beiden Teilprojekte (allgemeine Modernisierung der Gebäude einerseits – Entwicklung und Montage von GEDT-Fassaden andererseits) zu unterschiedlichen Zeitpunkten war bei der Planung der Anschlussdetails im Außenbereich maßgebend.
Hierzu wurde am Übergang WDVS-Fassade zur GEDT-Fassade in den beiden straßenseitigen Gebäudeecken eine Arbeitsfuge eingeführt. Sie ermöglicht die komplette dreiseitige Herstellung der WDVS-Fassade ohne zeitgleiche Fertigstellung der Straßenfassade. Vom Sockel bis zur Traufen-Bekleidung verlaufend dient sie zudem als gestalterische Trennfuge.
Sie wird im Fassadenbereich als WDVS ausgebildet und liegt aus gestalterischen Gründen ca. 3 cm hinter der übrigen Putzfassade ebenengleich mit dem Sockel des kompletten Gebäudes. Im Bereich der Traufe wird die Bekleidung aus Harzkomposit-Fassadenplatten in Fassadenbreite dunkel abgesetzt.
Straßenseitiger Sockel und Arbeitsfuge werden nach der Straßenfassade hergestellt.

2.4.8 Details der Ausführungsplanung

Die Detailplanung wurde durch Wärmebrückenberechnungen des IWU begleitet und maßgeblich unterstützt (siehe Kap. 2.6).

2.4.8.1 Fenster

Nähere Hinweise zur Entwicklung des Fensterdetails s. 2.4.4 Fensterintegration.

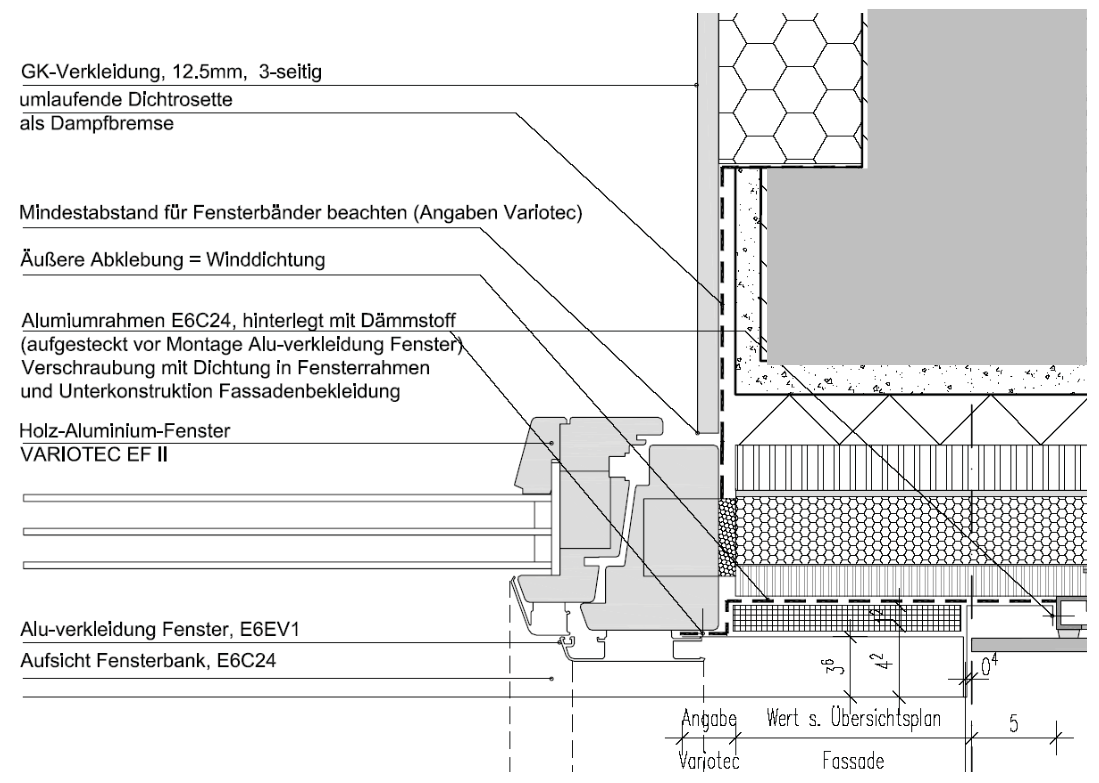


Abbildung 2.4-8: Fensteranschluss

2.4.8.2 Traufe

Die Entwicklung des Traufen-Details ist eng mit der allgemeinen energetischen Sanierung verknüpft. Zum Zeitpunkt der GEDT-Montage war die Sanierung des Daches inkl. der Traufen-Ausbildung bereits abgeschlossen. Die Fügung von GEDT und Traufen-Untersicht bzw. Traufen-Dämmung wurde so ausgebildet, dass die Untersicht bis auf die Traufen-Bekleidung mit Harzomposit-Fassadenplatten abgeschlossen werden konnte. Als Anschlusselement zur Traufe wurde ein mit der übrigen GEDT im Aufbau identisches Füll-GEDT-Element entwickelt, das den für die Montage der GEDT-Elemente notwendigen Abstand von 25 cm überbrückt. Durch eine Klemm-Konstruktion wird das Element zwischen Traufe und GEDT 2 bzw. 4 gehalten.

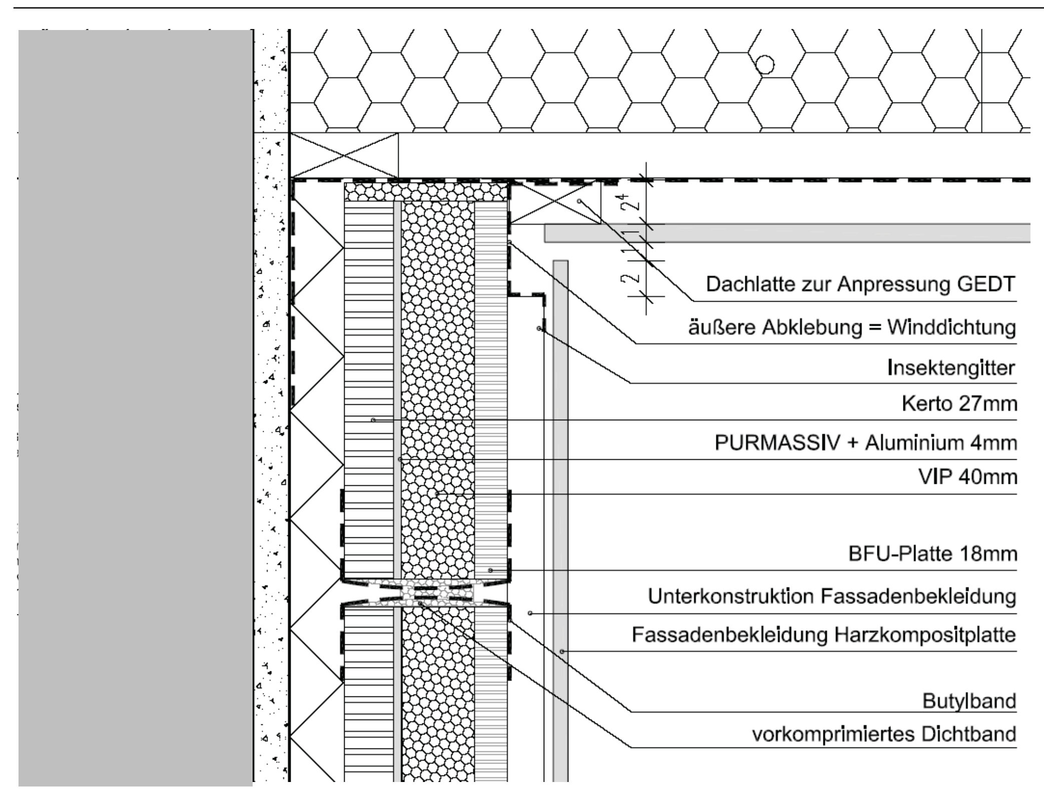


Abbildung 2.4-9: Traufe

2.4.8.3 Sockel

Aus energetischen Gründen ist eine Dämmung des Sockels mit Vakuumdämmung nicht notwendig. Die Unterkante der GEDT-Fassade endet in Höhe der Unterkante der Kellerdecke. Die Dämmung des Sockels erfolgt mit einem WDVS. Die Herstellung erfolgt nach der GEDT-Montage in Verbindung mit der seitlichen Arbeitsfuge (s. 2.4.7.2).

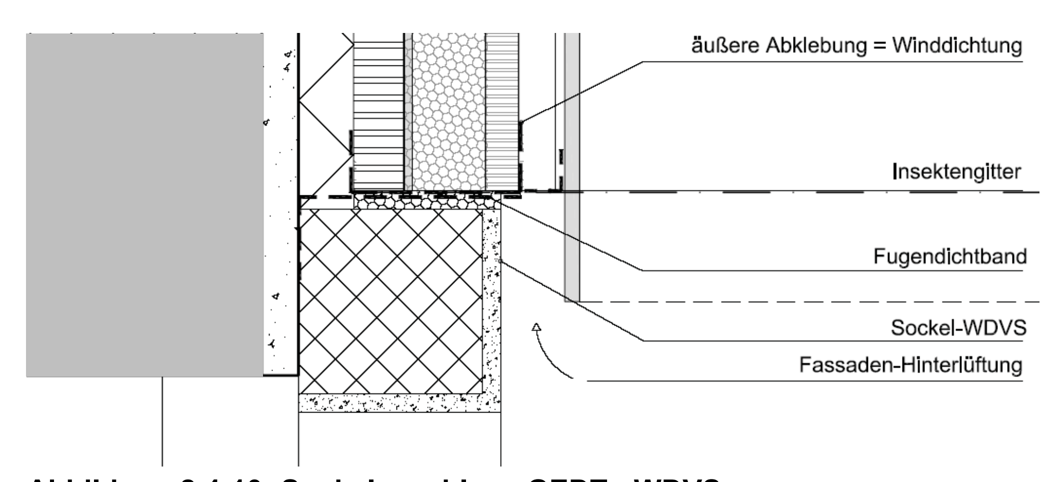


Abbildung 2.4-10: Sockelanschluss GEDT - WDVS

2.4.8.4 Gebäudeecke

Die Gebäudeecke ist in der Außenwirkung und Darstellung ein wichtiges Detail. An dieser Stelle treffen die beiden unterschiedlichen Fassaden „WDVS“ und „GEDT mit VIP“ aufeinander. Die Straßenfassade ragt seitlich über die WDVS-Fassade hinaus.

Wetterschutzschale und Dämmungsschale werden getrennt betrachtet. Die Ausbildung des Details verdeutlicht dies. Die Wetterschutzschale läuft nicht bis zur Gebäudeecke durch. Die

silberne Blechkante als Symbol für das Dämmpaket mit Vakuumdämmung schiebt sich darunter hervor.

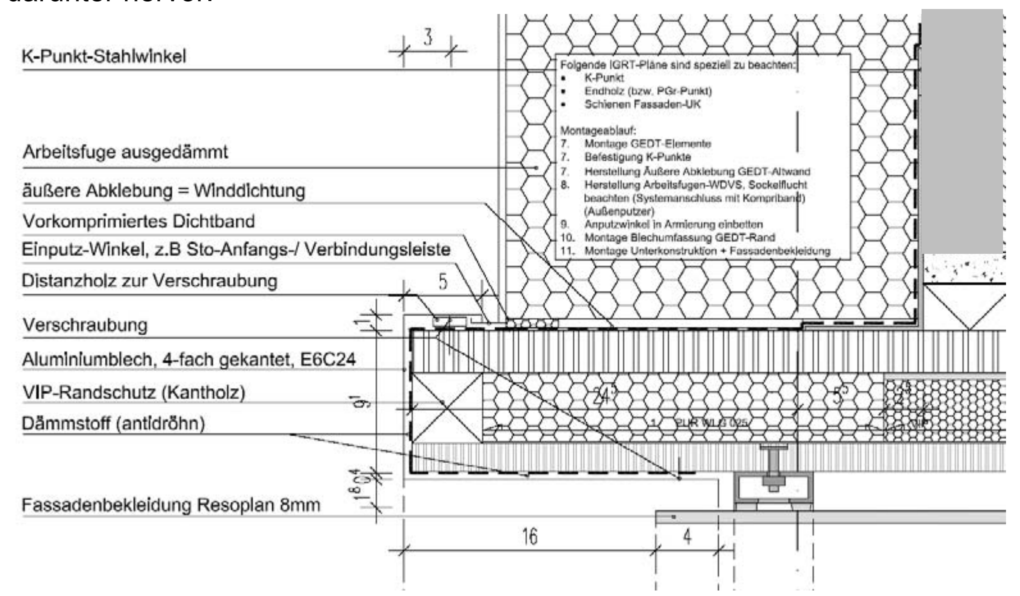


Abbildung 2.4-11: Gebäudeecke Anschluss GEDT - WDVS

2.4.8.5 Fassadenbekleidung

Nähere Hinweise zur Fassadenbekleidung s. 2.4.6 Fassadenbekleidung.

2.5 Planung von Fertigung und Montage

Für die Fertigung und Montage der Großelemente mit Vakuumdämmung war die Firma Variotec zuständig. Sie wurde insbesondere durch die Firma O.Lux in Georgensgmünd unterstützt, die als Unterauftragnehmer eingebunden wurde. Während der Planung der Elemente mussten sowohl die Produktionsbedingungen als auch die Bedingungen bei Transport und Montage detailliert berücksichtigt werden.

2.5.1 (Vor-)Fertigung der GEDT-Elemente

Die GEDT-Element-Abmessungen mussten auf die üblichen Fertigungsmaschinen abgestimmt werden. Die maximalen Abmessungen der Kerto-Platten liegen bei 2,5 m x 12 m (Sonderformat, Normalformat: 1,8 m x 12 m). Für das vorhandene Projekt wurden Rohplatten von 2,5 m x 6 m gewählt. Dieses Maß bietet hinsichtlich den üblichen Maschinenanforderungen und der bauseitigen Handhabung anwendungstypische Abmessungen. Die BFU Platten sind in den Abmessungen 1,25 m x 2,5 m bzw. 2 m x 4 m erhältlich. Im Projekt wurden Plattenbreiten von ca. 0,85 m, bedingt durch die statische Einteilungen der Durchdringungspunkte, verwendet.
Die Fassade wurde als Prototyp gefertigt, daher wurden hinsichtlich der Verarbeitung und zur Sicherheit handhabbare VIP Abmessungen zur manuellen Bearbeitung verwendet. Die Abmessungen der VIPs liegen bei 0,85 m x 2,2 m. Die größtmöglichen Abmessungen liegen bei 1,25 m x 3,00 m.

Zum Schutz der VIP vor Verletzung durch scharfkantige Stahlteile wurden beidseitig ca. 2,5 mm dicke Sperrholzschichten eingesetzt, wobei die Schicht auf der Kerto-Seite noch zusätzlich mit einem 0,25 mm dicken Aluminiumblech verklebt war. Die Sperrholzschichten sorgen für die notwendige Steifigkeit während der Fertigung, so dass u. a. eine formstabile Verklebung mit der Kerto-Platte erreicht werden kann. Die Aluminiumschicht wird im Durchlaufverfahren auf der Tragplatte aufgebracht. Die dem VIP zugewandte BFU-Innenseite wurde zum Schutz der VIP vor der Verklebung geschliffen. Zudem wird die Platte nach Einbau der Stahlteile mit einer PUR-Spachtel versehen, die die um 1 mm vertieften Stahlteile überdeckt.
Die Materialien Kerto und BFU wurden werkseitig mit einem CNC-Bearbeitungszentrum bearbeitet.
Die Verklebung der einzelnen GEDT-Schichten erfolgt mit PUR 1K Klebern. Die Sperrholzplatten wurden maschinell, alle übrigen Schichten manuell mit Leim mittels Leimauftragsvorrichtungen versehen. Die Metallpunkte wurden vor dem Verkleben in die Ausfräsungen der Kerto- bzw. BFU Platte eingelegt und verschraubt.
Nach der Verklebung der GEDT-Schichten wurde die Unterkonstruktion der Wetterschutzschale auf die BFU-Platten montiert. Die über die GEDT überstehenden Unterkonstruktionsprofile (Bereich im Übergang vom oberen zum unteren GEDT) wurden zum einfacheren Transport erst bauseits montiert.

2.5.2 Messstand

Zur Überprüfung der fertigen GEDT-Elemente vor dem Transport zur Baustelle wurden Überlegungen für einen GEDT-Teststand angestellt. Aus Termingründen musste jedoch auf die Realisierung des Teststandes und die Messungen der Elemente verzichtet werden. Einige Grundgedanken des Ansatzes sind im Folgenden skizziert, eine ausführlichere Darstellung der Planungen findet sich in Anhang V.
Um die Messungen in einem möglichst kurzen Zeitraum durchführen zu können, sollten zwei GEDT-Elemente gleichzeitig gemessen werden. Der Messstand sah folgenden Aufbau vor:

- Gegenüberliegende Anordnung der GEDT-Elemente an der vorhandenen Montage-Traverse und einer zusätzlich erforderlichen Montage-Traverse mit geänderter Gabelanordnung
- Aufhängung an einer Holz-Tragkonstruktion bemessen nach dem größten GEDT-Element. Anpassungsfähigkeit in Höhe und Breite
- Dämmung über Holzfaserplatten WLG 050, d= 60 mm auf Spanplatten, d=15 mm. Fügung an GEDT über vorkomprimierte Dichtbänder
- Einblas-Öffnungen zur Beheizung im unteren Drittel
- 1 Absaug-Öffnungen zur Abführung der zugeführten Luft im oberen Drittel.

2.5.3 Transport

Für den Transport von den Produktionshallen der Firma O.Lux in Georgensgmünd (in der Nähe von Nürnberg) zur Baustelle in Hofheim wurden zwei Varianten diskutiert: Der Einsatz eines Tiefladers oder eines Innenladers (nach Art eines Glas-Innenladers für den Transport von Glasscheiben). Eine konkretere Ausarbeitung erfolgte durch IGRT.

Als Transportmöglichkeit bot sich zunächst ein klassischer Transport auf einem Tieflader mit spezifisch präparierten Transportständern mit entsprechenden Montage- und Fixierungsvorrichtungen für die Großelemente (vgl. Abbildung 2.5-1). Der Nachteil des Transportes auf einem Tieflader liegt gegenüber der nachfolgend beschriebenen Alternative „Glas-Innenlader“ darin, dass die Transportständer mit den Aufhänge- und Fixierungsvorrichtungen eigens herzustellen gewesen wären, was sich naturgemäß nur für größere Anwendungsserien lohnt.

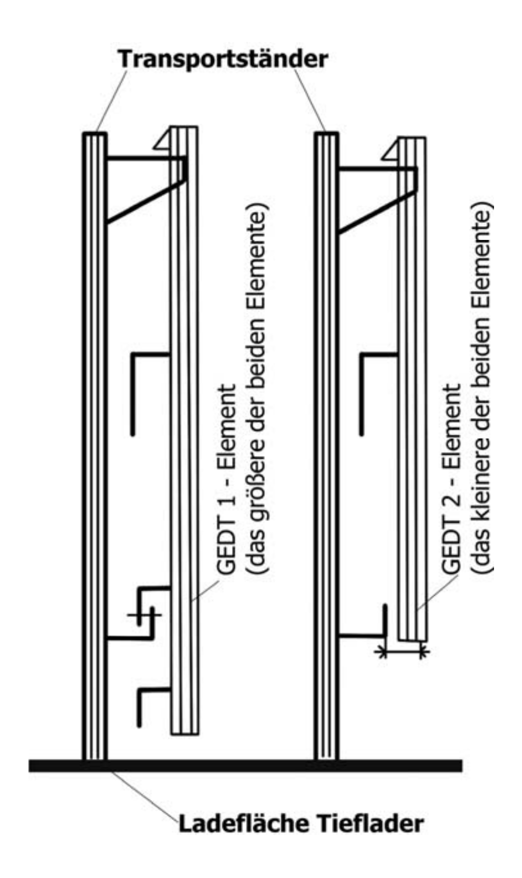
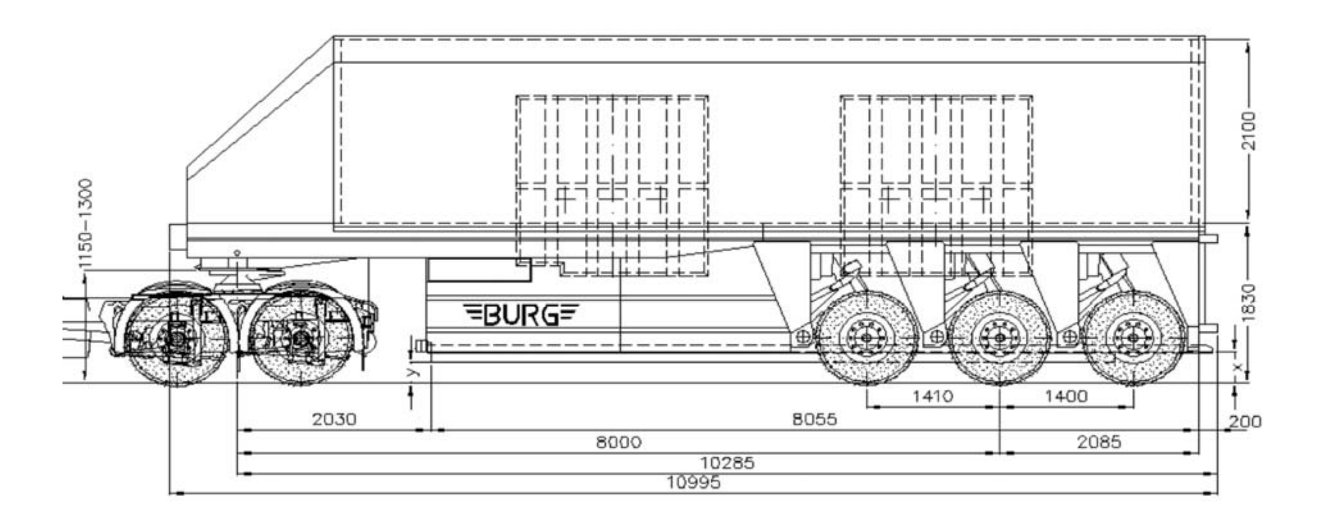


Abbildung 2.5-1: Transportständer mit Montagevorrichtung zur Befestigung der GEDT-Elemente auf der Ladefläche eines Tiefladers

Eine interessante Alternative, die am Ende realisiert wurde, stellte somit der Transport mittels Glas-Innenlader dar, der insbesondere für kleinere Anwendungsserien geeignet ist, weil hier die Lagerung und Fixierung der Großelemente auf einfache Weise durch Aufständerung (aus statischen Gründen jedoch ausnahmslos auf der inneren Beplankung KERTO) möglich ist und hier keine Transportständer benötigt werden (Abbildung 2.5-2). Abbildung 2.5-2 zeigt einen Glas-Innenlader, Längsschnitt (oben), Außenansicht (links unten), Querschnitt eines Glas-Innenladers mit aufgestellten GEDT-Elementen (rechts unten).
Der Transport der Elemente wird in vertikaler Lage auf einer einem Glasbock (Vorrichtung zum Transport empfindlicher Glasscheiben) ähnlichen Vorrichtung durchgeführt. Zur Sicherung der Elemente werden marktübliche Sicherungsmaterialien wie z. B. Gurtbänder und Distanzleisten genutzt.



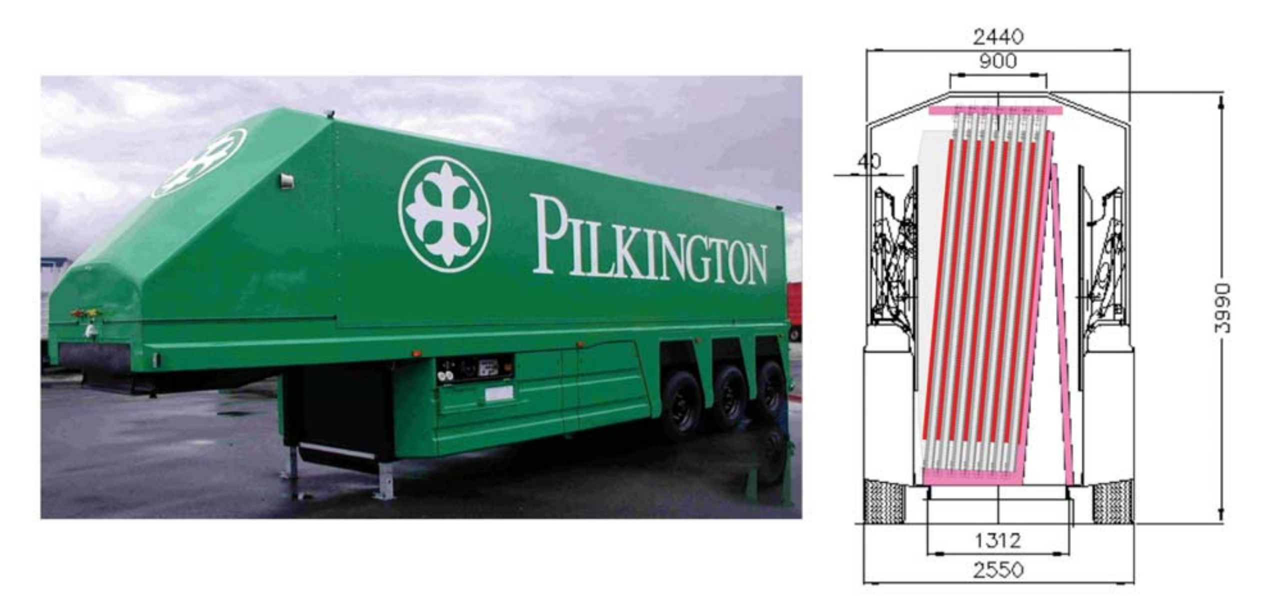


Abbildung 2.5-2: Glas-Innenlader, Längsschnitt (oben), Außenanasicht (links unten), Querschnitt eines Glas-Innenladers mit aufgestellten GEDT-Elementen (rechts unten)

2.5.4 Montage vor Ort

Die Montage vor Ort lässt sich in drei Hauptabschnitte gliedern:

- Montage der Wandbefestigungen
- Montage der GEDT
- Montage der Wetterschutzschale

Die Montage der Wandbefestigungen erfolgt ungefähr zeitgleich mit der Endphase der Fertigung der GEDT-Elemente. Die Wandbefestigungen sind so konzipiert, dass vorher ermittelte Ungenauigkeiten der Bestandfassade ausgeglichen werden können. Sie werden zur Vorbereitung der GEDT-Montage voreingestellt.

Bauseitig werden die vorgefertigten GEDT-Elemente mit einem Teleskopstapler von der abgestellten Wechselpritsche genommen und an die vormontierten, ausgerichteten

Wandbefestigungen (Punkte E und W) gehängt. Zur Applikation der Großelemente wird eine eigens dafür entwickelte Montage-Traverse genutzt. Die Traverse aus einem u-förmigen Stahlträger mit Haltetaschen für die Gabeln des Staplers wird mit Haltepunkten an den E-Befestigern der GEDT-Elemente befestigt. Dadurch wird eine passgenaue Montage gewährleistet. Die Montage erfolgt jeweils von unten nach oben. Begonnen wird in der linken unteren Ecke.

Nach erfolgter GEDT-Montage werden alle Element-Fugen und Anschlüsse an angrenzende Bauteile (WDVS-Sockel, WDVS-Ost- und Westfassade, Traufe) mit diffusionsoffenen Dichtbändern (Butylvlies) abgeklebt.

Anschließend werden die werkseitig nicht vormontierten Schienen der Unterkonstruktion montiert. Dies ist notwendig, da die Schienen elementübergreifend befestigt werden, um anschließend die Harzkomposit-Fassadenplatten im vorgegebenen Verlegemuster anbringen zu können. Das Verlegemuster sieht eine Überdeckung der Horizontalfuge vor. Nach der Verklebung der Fassadenplatten werden die Bereiche Dach, Sockel und WDVS angearbeitet.

Abbildung 2.5-3 zeigt die Montage-Traverse mit angehängtem Großelement GEDT 1 sowie die Details des Anschlusses des E-Punkts an die Montage-Traverse. Die Befestigung des Großelements an der Montage-Traverse erfolgt je über 2 Laschen (Transport-Haken) je E-Punkt. An der Montage-Traverse selbst sind zwei Hülsen zur Aufnahme der Gabeln des Mobilkrans vorgesehen, deren Lage aus der Abbildung hervorgeht, weitere Detailpläne finden sich in Anhang II.

Im Zusammenhang mit der Planung der Vor-Ort-Montage sind im vorliegenden Abschnitt noch Maßnahmen zu erwähnen, die im Sinne Unfallverhütung und eines möglichst reibungslosen Arbeitsablaufs ergriffen wurden.

Entsprechend Abschnitt III der Unfallverhütungsvorschriften „Bauarbeiten“ für Montagearbeiten war eine schriftliche Montageanweisung/Montageanleitung zu erstellen, die alle erforderlichen sicherheitstechnischen Angaben enthält. Insbesondere sind darin die Zwischenlagerung sowie Transport- und Montagezustände zu beschreiben. Die Maßnahmen zur Erstellung von sicheren Arbeitsplätzen und Zugängen müssen aufgeführt werden, sowie die dazu gehörigen Übersichtszeichnungen enthalten sein. Sämtliche Unterlagen müssen auf der Baustelle vorhanden sein, alle bei den Arbeiten Beteiligte müssen unterwiesen sein.

Im Rahmen der Bearbeitung wurde auch die Vorankündigung an das Amt für Arbeitsschutz (Regierungspräsidium Darmstadt) erstellt. Die Gefährdungsanalyse der ausführenden Firmen wurde im Rahmen der Vorbereitung angefordert und von Fa. Variotec mit den weiteren Firmen vor Ort koordiniert.

Der Ablauf der GEDT-Montage wurde in einer genauen Beschreibung zusammengefasst und an die verarbeitenden Firmen übergeben (s. Anhang VI).

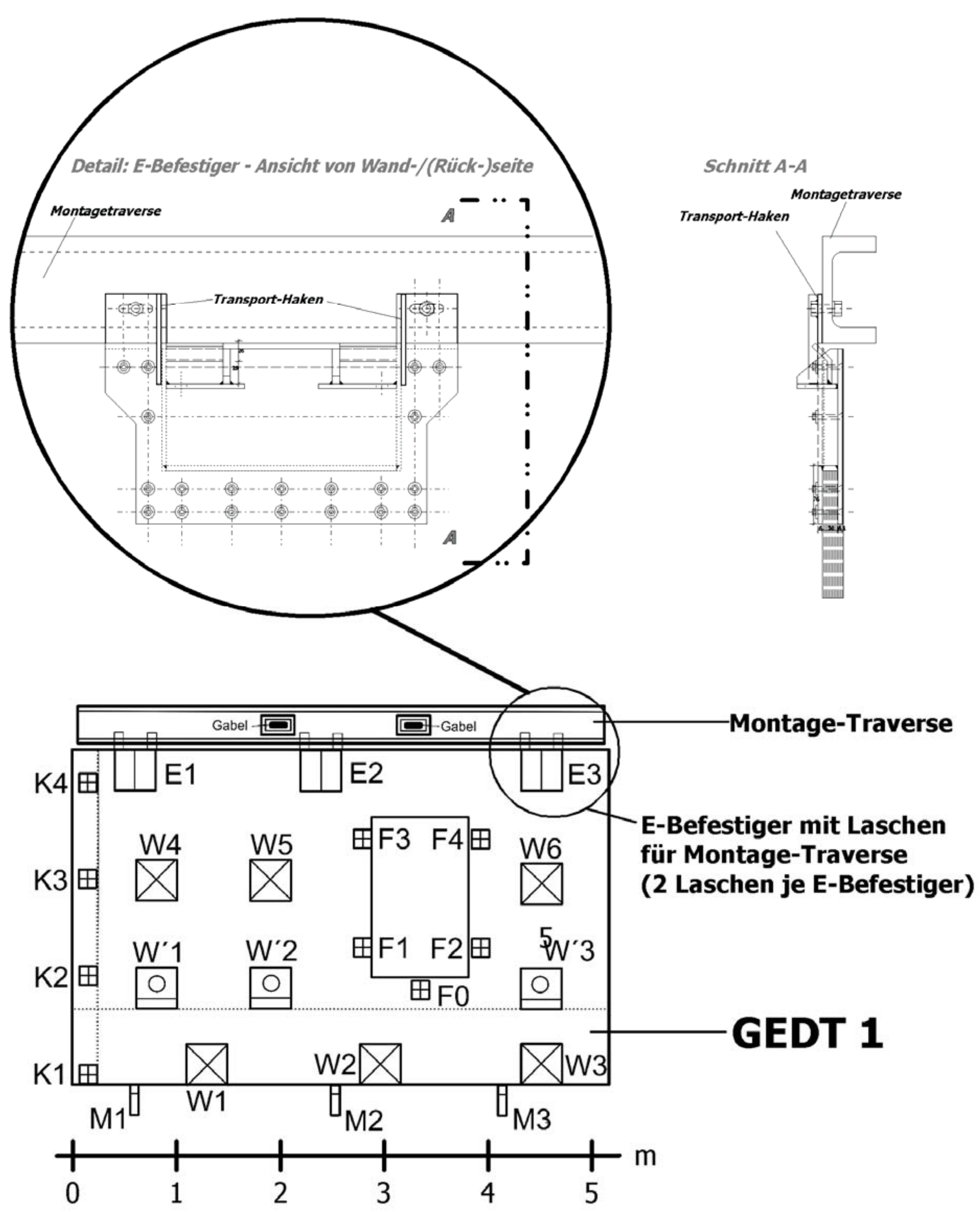


Abbildung 2.5-3: **Montage-Traverse mit angehängtem Großelement GEDT 1 sowie Details des Anschlusses des E-Punkts an die Montage-Traverse**

2.6 Wärmetechnische Eigenschaften der GEDT-Elemente

2.6.1 Überblick

Die in den GEDT-Elementen eingesetzte Vakuumdämmung weist laut Herstellerangaben eine äußerst geringe Wärmeleitfähigkeit λ von ca. 0,005 W/mK auf. Bei herkömmlichen Dämmstoffen liegt die Wärmeleitfähigkeit dagegen zumeist bei 0,03 – 0,05 W/mK, also sechs- bis zehnmal höher.

Berechnet man den Wärmedurchgangskoeffizienten (U-Wert) für die mit einem GEDT-Element gedämmte Wand auf Grundlage der vorgesehenen Schichtenfolge (Altwand, Ausgleichsdämmung, Kerto, Alu, Sperrholz-Schutzschicht, VIP, Sperrholz-Schutzschicht, BFU), so erhält man einen U-Wert von 0,1 W/m²K. Die am stärksten Wärme dämmende Schicht wird durch das 4 cm starke Vakuumisolationspaneel (VIP) gebildet. Würde man die anderen Materialien völlig vernachlässigen, läge der U-Wert immer noch bei 0,12 W/m²K.

Zur Ermittlung eines realistischen U-Werts für den praktischen Einsatz der Elemente ist diese Betrachtung allerdings zu stark vereinfacht. Es müssen noch folgende Faktoren berücksichtigt werden:

- Die Vakuumelemente unterliegen einer Alterung: Es ist damit zu rechnen, dass sich durch Eintrag von Wasserdampf und Luft die Wärmeleitfähigkeit innerhalb der Lebensdauer der Elemente (d. h. nach einigen Jahrzehnten) erhöht. Im Sinne eines realistischen „Bemessungswertes“ ist daher diese höhere Wärmeleitfähigkeit von etwa 0,008 W/mK anzusetzen [Gellert 2005]. Der U-Wert des GEDT-Elements (inklusive Altwand) beläuft sich dann auf 0,147 W/m²K.
- Die „ungestörte“ Schichtenfolge, die dieser Betrachtung zu Grunde liegt, lässt sich in der Praxis nicht realisieren: Dort, wo die einzelnen GEDTs aneinanderstoßen bzw. – innerhalb der GEDTs – die VIP-Ränder liegen, ist die ideale Struktur unterbrochen, und es treten Wärmebrücken auf. Erhöhte Wärmeverluste gibt es auch an den Durchdringungspunkten aus Edelstahl, die dem GEDT die notwendige Stabilität verleihen. Insgesamt lässt sich ein durch die genannten Wärmebrücken bedingter Zuschlag auf den U-Wert von ΔU = 0,041 W/m²K ermitteln.

Unter Berücksichtigung der Alterung und der Wärmebrücken ergibt sich für die GEDT ein Wärmedurchgangskoeffizient von U = 0,188 W/m²K. Es handelt sich dabei um einen Mittelwert (inkl. Füll-GEDTs), da GEDTs unterschiedlicher Größe verwendet werden. Der U-Wert der „kleinen GEDTs“ mit der Fläche 11,1 m² beläuft sich auf U = 0,192 W/m²K, bei den großen GEDTs“ (15,5 m²) liegt er bei U = 0,184 W/m²K. Im Folgenden werden, wenn nichts anderes genannt ist, immer die Mittelwerte angegeben.

Im Zusammenhang mit den VIPs ist auch der Fall des kompletten Versagens der schützenden Hüllfolie von Interesse. Wenn diese Hülle z. B. durch äußere Beschädigungen oder im Laufe der Jahre undicht wird, führt dies zur Zerstörung des Vakuums: Das Vakuum-Isolationspaneel wird belüftet. In diesem Fall erhöht sich die Wärmeleitfähigkeit des Paneels auf ca. 0,02 W/mK. Sie ist dann etwa halb so groß wie bei herkömmlichen Dämmstoffen. Der U-Wert des GEDT-Elements erhöht sich im Bereich eines belüfteten VIP auf 0,287 W/m²K. Er liegt damit noch unterhalb der Vorgaben der EnEV für die Wärmedämmung von Bestandsaußenwänden (U = 0,35 W/m²K).

Die genannten U-Werte beschreiben das GEDT-„Grundelement“ (eingehauste VIPs mit der oben beschriebenen Schichtenfolge). Das in das Fassadenelement integrierte Fenster inklusive Rahmen ist separat zu berücksichtigen. Entsprechend verhält es sich mit der Bezugsfläche: Der genannte U-Wert des GEDT bezieht sich auf den Flächenanteil der Fassade, der von dem GEDT-Grundelement überdeckt wird, d. h. die Fassadenfläche abzüglich der Fensterfläche. Im Falle eines einzelnen GEDT-Elements sind dies 15,5 bzw. 11,1 m², bei vier Elementen pro Gebäudefassade ergeben sich 55,9 m² pro Fassade (inkl. Füll-GEDT, ohne Fenster)[2]. Auch die durch den Anschluss zwischen GEDT-Grundelement und Fenster gebildete Wärmebrücke ist in dem genannten Wert nicht enthalten. Das Gleiche gilt für die Wärmebrücken der äußeren Anschlüsse der GEDTs (an die Traufe, den Sockel und seitlich an das Wärmedämmverbundsystem der West- und Ostfassaden). Die zusätzlichen Wärmebrücken werden bei der hier gewählten Systematik nicht dem Bauteil zugeordnet, sondern bei der Gesamtbilanz der Transmissionswärmeverluste, gemeinsam mit allen weiteren Wärmebrücken des Gebäudes, separat berücksichtigt. Der zusätzliche Transmissionswärmeverlust der Wärmebrücken an diesen Anschlüssen summiert sich für eine komplette Fassade auf 0,844 W/K.

Im Folgenden werden die Einzelheiten der vom IWU durchgeführten wärmetechnischen Analyse beschrieben. Neben der Herleitung der genannten U-Werte der GEDT-Elemente unter Berücksichtigung von Alterung und internen Wärmebrücken werden dabei am Ende auch die Wärmebrücken der äußeren Anschlüsse dokumentiert.

2.6.2 Alterung der Vakuumdämmung

Vakuumdämmplatten können durch ihre Evakuierung und die zugesetzten Trübungsstoffe zur Verminderung des Strahlungsaustauschs im Labor Wärmeleitfähigkeiten bis unter 4 mW/(mK) erreichen [Annex 2005]. Das FIW hat für VIP-Paneele der Firma Variotec eine Wärmeleitfähigkeit von 0,00484 W/(mK) bei 20 °C bzw. 0,00455 W/(mK) bei 10 °C gemessen [FIW 2005]. Diese Werte entsprechen der Wärmeleitfähigkeit im Auslieferungszustand**.**

Vakuumdämmplatten unterliegen jedoch einer Alterung, die von der Menge an Luft- und Wassermolekülen abhängig ist, die im Laufe der Zeit durch die Hüllfolie diffundieren. Die Hersteller haben aus diesem Grund spezielle Hochbarrierefolien entwickelt, die diese Gaspermeation minimieren. Der zeitliche Verlauf der Gaspermeation bestimmt die Entwicklung der Wärmeleitfähigkeit und somit die Lebensdauer der Vakuumdämmplatten.

In [Annex 2005] wird für die Erhöhung der Wärmeleitfähigkeit eines 50 x 50 x 2 cm großen VIPs von 4 auf 8 mW/(mK) eine Zeit von 31,6 Jahren angegeben. Die in Hofheim eingesetzten Formate sind jedoch dicker (4 cm) und höher (bis über 2 m Länge) als die Labor-VIPs. Durch das damit verbundene größere Volumen der Platten im Verhältnis zur Folien-Hüllfläche und Siegelnahtlänge ist zu erwarten, dass die Verhältnisse bei den VIPs für Hofheim günstiger liegen.

Das FIW München bearbeitet zurzeit ein Forschungsprojekt, bei dem die Wärmeleitfähigkeit von Vakuumdämmstoffen über eine Lebensdauer von 20 bis 50 Jahren vorhergesagt werden soll [Gellert 2005]. Nach dem Erreichen einer Wärmeleitfähigkeit von z. B. 8 mW/(mK) ist

[2] Die Gesamtfassadenfläche im Ist-Zustand inklusive der vier Fenster beträgt im Vergleich dazu 61,7 m².

jedoch die Lebensdauer nicht beendet, sondern es findet danach nur ein allmählicher weiterer Anstieg der Wärmeleitfähigkeit statt. Die Vakuumdämmung ist dann immer noch deutlich leistungsfähiger als konventioneller Dämmstoff.
Wird eine Vakuumdämmplatte durch mechanische Beschädigung oder Versagen der Hüllfolie undicht, so wird das VIP belüftet und die Wärmeleitfähigkeit steigt auf ca. 20 mW/(mK). [Porextherm]. Diese Wärmeleitfähigkeit liegt noch deutlich unter den λ-Werten, die konventionelle Dämmstoffe erreichen (25 – 55 mW/(mK)). In den Berechnungen zum Gesamt-U-Wert ist als Extremfallbetrachtung auch der Fall einer Belüftung aller VIPs zu finden.

Der Bemessungswert für Vakuumdämmplatten mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung ist bei einigen Produkten auf $\lambda_{Bemessung}$ = 0,008 W/(mK) festgelegt worden [va-q-tec]. Dieser wurde auch in den folgenden Berechnungen als Variante berücksichtigt**.** Hier muss aber erwähnt werden, dass bei der Berechnung des Gesamt-U-Wertes der GEDT-Elemente der Einfluss der Wärmebrücken am Folienrand genau für die verwendeten Formate berücksichtigt wurde. In dem Bemessungswert für die Wärmeleitfähigkeit nach [Gellert 2005] ist dieser Wärmebrückeneinfluss ebenfalls enthalten, er fließt hier also – im Sinne einer konservativen Abschätzung - doppelt in die Berechnung ein.

2.6.3 Methodik der Wärmebrückenberechnung

Es wird in den folgenden Untersuchungen zwischen linienförmigen (z. B. Stöße zwischen den VIPs) und punktförmigen Wärmebrücken (z. B. Durchdringung der GEDT durch Metallanker) unterschieden. Beiden Typen werden Wärmebrückenverlustkoeffizienten (allgemein abgekürzt als WBV) zugeordnet. Der Anteil der jeweiligen Wärmebrücke am gesamten Transmissionsverlust des Gebäudes (in Watt pro Kelvin, W/K) berechnet sich nach folgenden Gleichungen:

Linienförmige Wärmebrücken:
Transmissionswärmeverlust (in W/K) = Wärmebrückenverlustkoeffizient ψ (in W/mK)
x Länge der Wärmebrücke (in m)

Punktförmige Wärmebrücken:
Transmissionswärmeverlust (in W/K) = Wärmebrückenverlustkoeffizient χ (in W/K)
x Häufigkeit der Wärmebrücke

Dividiert man den Transmissionswärmeverlust der Wärmebrücke durch die Fläche des zugehörigen Bauteils, so ergibt sich der Zuschlag ΔU in W/m²K, der auf den U-Wert des „ungestörten“ Bauteils aufgeschlagen werden muss.

Zur Berechnung der Wärmebrückenverlustkoeffizienten stehen verschiedene etablierte Softwareprodukte zur Verfügung. Im vorliegenden Fall kamen die folgenden Programme zur Anwendung:
Die Modellierung der Hüllfolie und die Berechnungen der punktförmigen Wärmebrücken erfolgten mit dem Programm Heat3 (Version 4, 3D-Modell mit finiten Differenzen) der Firma Blocon aus Schweden. Die VIP-VIP- und die GEDT-GEDT-Fugen wurden mit dem

Programm Heat2 (Version 6, 2D-Modell mit finiten Differenzen) vom gleichen Hersteller berechnet. Anschlussdetails an die GEDT (z. B. Fenster, Sockel, WDVS) wurden mit dem Programm Therm (Version 5, 2D-Modell mit finiten Elementen) des Lawrence Berkley Lab., USA untersucht.

Eine besondere Schwierigkeit für die Berechnung entsteht durch die Hüllfolie der Vakuumisolationspaneele, die aus mehreren Schichten besteht, von denen einige nur wenige zehn Nanometer (nm) dick sind. Übliche Wärmebrückenprogramme können derart kleine Längen nicht verarbeiten. Selbst wenn dies möglich wäre, stieße die Berechnung an praktische Probleme: Die gleichzeitige Abbildung von Längen im Nano- oder Mikrometerbereich und von Längen im Bereich bautypischer Wärmebrücken (z. B. mehrere cm bis ca. 1 m) in einem einzigen Berechnungsgang ist ebenfalls kaum durchführbar. Zusätzlich erschwert das Vorhandensein hoch leitender und hoch dämmender Schichten in unmittelbarer Nachbarschaft (Vakuumdämmung und Aluminium) die softwaregestützte numerische Lösung des Wärmeleitungsproblems.

Aus diesem Grund wird die Hüllfolie der VIPs mit Hilfe eines vereinfachten Modells beschrieben: Anstelle eines mehrschichtigen Aufbaus wird in den Wärmebrückenberechnungen ein Ersatzmaterial, d. h. eine einzige homogene Schicht angesetzt, deren Dicke 0,1 mm beträgt und damit ungefähr der tatsächlichen Dicke typischer Hüllfolien entspricht. Diese Dicke kann bei allen eingesetzten Softwareprodukten noch verarbeitet werden.

Um dieses Ersatzmodell herzuleiten, musste zunächst der Wärmebrückenverlust über den Folienrand unter Berücksichtigung des tatsächlichen Aufbaus der Folie ermittelt werden. Dies erfolgte mit Hilfe von Heat3, welches als einziges der verwendeten Programme Längen im Nanometerbereich abbilden konnte.

Die Hüllfolie der in der Wilhelmstraße in Hofheim verwendeten Vakuumdämmpaneele besteht aus einer mehrlagigen Verbundfolie, die die Funktionen der Gasdichtung mit minimalen Wärmebrückeneffekten verbinden soll. Ein typischer Aufbau einer solchen Folie ist:

40 μm PET-Folie, 40 nm Aluminium, 40 μm PET-Folie, 40 nm Aluminium, 40 μm PET-Folie

Die Wärmebrückenwirkung über den Folienrand wurde für verschiedene Leitfähigkeiten des VIP-Kerns und für verschiedene Dicken der Elemente untersucht. Als Randbedingung wurden 30 Kelvin Temperaturdifferenz gewählt, um einen hohen absoluten Wärmestrom und somit eine höhere Rechengenauigkeit bei der Weiterverarbeitung der Ergebnisse zu erreichen. Die folgende Tabelle 2.6-1 zeigt die Wärmebrückenverlustkoeffizienten (WBV) der einzelnen Varianten.

Tabelle 2.6-1: Übersicht der Berechnungsergebnisse für das Hüllfolienmodell

Variante	q mit Folie [W/m]	q ungestört [W/m]	WBV [W/(mK)]
VIP 40 mm λ=0,05 W/mK	3,6955	3,6715	0,00080
VIP 40 mm λ=0,08 W/mK	5,825	5,8013	0,00079
VIP 40 mm λ=0,20 W/mK	13,838	13,817	0,00070
VIP 20 mm λ=0,05 W/mK	7,2352	7,1922	0,00143
VIP 20 mm λ=0,08 W/mK	11,272	11,231	0,00137
VIP 20 mm λ=0,20 W/mK	25,649	25,615	0,00113

λ: Wärmeleitfähigkeit, q: Wärmestrom bei der Wärmebrückenberechnung

Die drei gewählten Wärmeleitfähigkeiten des VIP-Kerns (λ = 0,005 W/mK, 0,008 W/mK bzw. 0,020 W/mK) entsprechen, wie bereits erwähnt, etwa dem fabrikneuen Zustand, dem langjährigen Mittelwert inklusive Alterung und dem eines belüfteten VIPs. Der Einfluss der Wärmebrücke sinkt leicht mit steigender Wärmeleitfähigkeit des VIP-Kerns und eine Halbierung der Dicke des VIPs bewirkt eine Erhöhung des Wärmebrückenverlustkoeffizienten um 62 % - 79 %.
In der Folge wurde die Wärmeleitfähigkeit des Ersatzmaterials ermittelt, die bei einer Schichtdicke von 0,1 mm zu den gleichen Verlusten über den Randverbund führt wie die tatsächliche Hüllfolie.

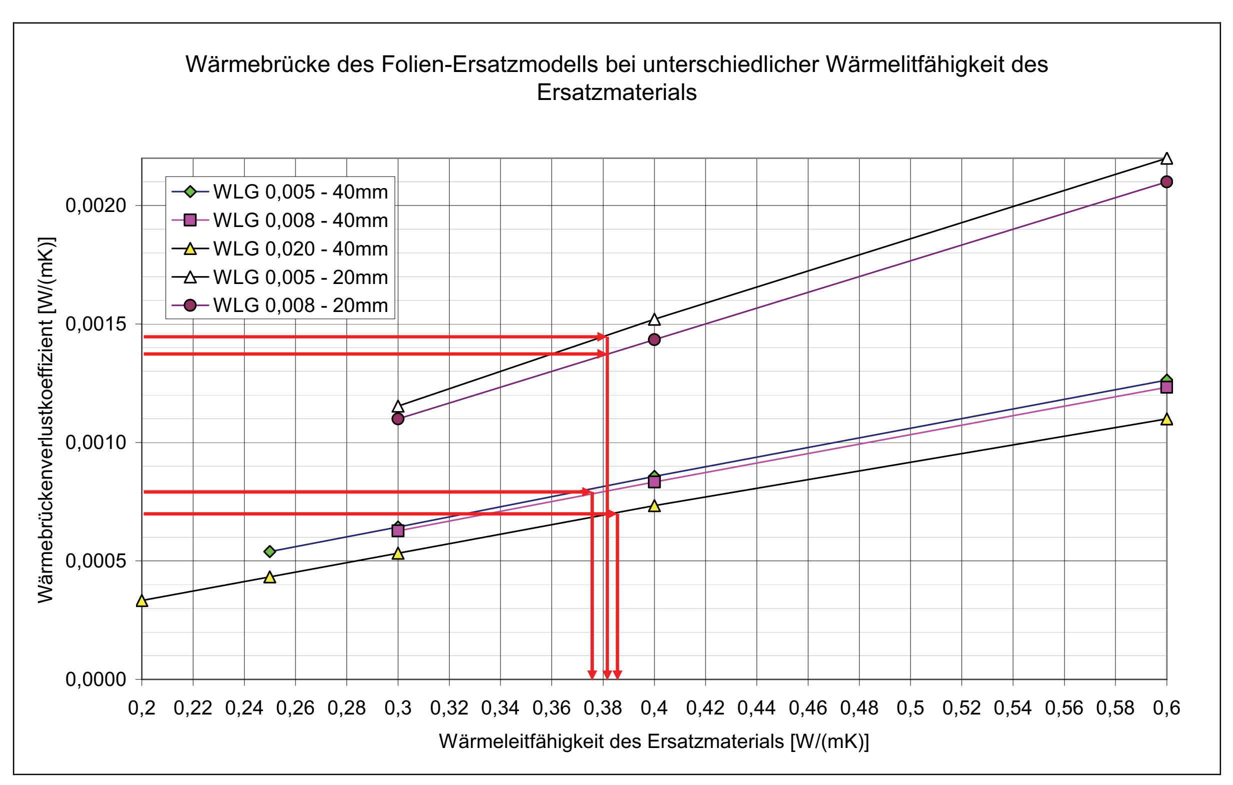


Abbildung 2.6-1: Darstellung der Wärmebrückenverlustkoeffizienten bei verschiedenen VIP-Dicken und –Wärmeleitfähigkeiten und daraus abgeleitetes Ersatzmaterial

Abbildung 2.6-1 zeigt die Berechnungsergebnisse für verschiedene Wärmeleitfähigkeiten des Ersatzrandverbundes sowie für verschiedene VIP-Dicken und VIP-Wärmeleitfähigkeiten. Die eingetragenen Pfeile geben an, wie ausgehend von den mit dem detaillierten Modell berechneten WBV-Werten (Ausgangspunkte auf der y-Achse) die Wärmeleitfähigkeit des Ersatzmaterials (auf der x-Achse) ermittelt wird. Unabhängig von der Dicke des VIPs und mit nur geringem Einfluss der Wärmeleitfähigkeit ergibt sich eine äquivalente Wärmeleitfähigkeit von 0,38 W/(mK) für das Ersatzmodell. Somit kann dieser Wert gut für weitere Berechnungen in Anschlussdetails verwendet werden.

[Willems2005] berechnet für VIPs mit einer Wärmeleitfähigkeit von 0,008 W/(mK) und mit leicht abgewandelten Materialkennwerten und Folienaufbauten einen Wärmebrückenverlustkoeffizient von 0,00137 W/(mK) sowie eine äquivalente Leitfähigkeit des Ersatzmaterials von 0,38 W/(mK). Die Ergebnisse passen somit gut zusammen. Allerdings ändert sich die äquivalente Wärmeleitfähigkeit bei [Willems2005] deutlich, wenn

die Hüllfolie einen wesentlich anderen Aufbau (besonders bei Verwendung von mehr Aluminium) aufweist.

2.6.4 Wärmebrücken an den VIP/VIP- und GEDT/GEDT-Stößen

Die Vakuum-Isolationspaneele innerhalb der GEDT stoßen nicht direkt aneinander, da sie immer auch Maßtoleranzen aufweisen. In den Zwischenräumen befinden sich zur Ausfüllung von Unebenheiten (z. B. wegen der Siegelnähte) und als mechanischer Schutz vorkomprimierte Fugendichtungsbänder („Kompribänder"). Die Planungswerte für die Fugenbreite der VIP/VIP-Fugen lagen in der Größenordnung von 2 - 4 mm, die realen Fugenbreiten und ihre energetischen Auswirkungen werden in Kapitel 2.6.6.2 diskutiert. Kompribänder haben eine befriedigende Dämmwirkung, ihre Wärmeleitfähigkeit beträgt ca. 0,055 W/(mK) [illbruck].

Die GEDT/GEDT-Fugen sind aus wärmetechnischer Sicht sehr ähnlich wie die VIP/VIP-Fugen aufgebaut: Hier stoßen die Rand-VIPs der jeweiligen GEDT-Elemente aneinander. Diese sind mit Kompribändern und einem Butylkautschuk-Klebeband zwischen der BFU- und Kerto-Platte geschützt. Der verbleibende Zwischenraum zwischen den GEDT wird ebenfalls durch ein weiteres Kompriband gefüllt. Der Unterschied zur VIP-VIP-Fuge liegt somit nur noch darin, dass das oberhalb und unterhalb der VIP/VIP-Fuge liegende Holz (Kerto, BFU) hier durch ein Fugenband ersetzt wird. Dessen Wärmeleitfähigkeit unterscheidet sich zwar mit 0,055 W/mK von den Holzwerkstoffen (0,15 W/mK). Dieser Unterschied hat aber, da es sich um den Randbereich der Wärmebrücke handelt, keinen großen Einfluss. Bei genauer Berechnung weicht der Wärmebrückenverlustkoeffizient der GEDT-GEDT-Fuge je nach Fugenbreite und Wärmeleitfähigkeit der VIPs nur zwischen 1 % (große Fuge) und max. 8 % (kleine Fuge und hohe VIP-Leitfähigkeit) von der VIP-VIP-Fuge ab. Diese geringe Toleranz kann angesichts der Unkenntnis über die exakte Breite der GEDT-GEDT-Fuge und die Ausführung der Ausgleichsdämmung hinter dem GEDT, die ja vom praktischen Ablauf der Installation abhängig ist, vernachlässigt werden.
Die GEDT-GEDT-Fuge kann daher bei der Berechnung genauso behandelt werden wie die VIP-VIP-Fuge, die horizontale Schichtenfolge lautet VIP/Kompriband/VIP. Natürlich ist die GEDT-GEDT-Fuge weitaus breiter, bei der GEDT-Montage wurde ein Wert von ungefähr 15 mm angestrebt (Näheres zur gemessenen Fugenbreite in Kapitel 2.6.6.2).

Die Abbildung 2.6-2 zeigt den Wärmebrückenverlustkoeffizent der VIP-Fugen bzw. GEDT-Fugen in Abhängigkeit der Fugenbreite und der Wärmeleitfähigkeit des VIP-Kerns für einen GEDT-Aufbau mit 40 mm Vakuumdämmung.
In der Abbildung ist zu erkennen, dass der Wärmebrückenverlustkoeffizient mit steigender Wärmeleitfähigkeit der Vakuumdämmung absinkt (Dreiecke, Quadrate, Rauten). Ist beispielsweise ein VIP defekt, so schwächt sich der Einfluss der Wärmebrücke an der Fuge stark ab (Dreieck-Symbole im Diagramm). Natürlich ist der Wärmeverlust insgesamt dennoch höher, da sich ja auch der U-Wert des ungestörten Bauteils entsprechend vergrößert.

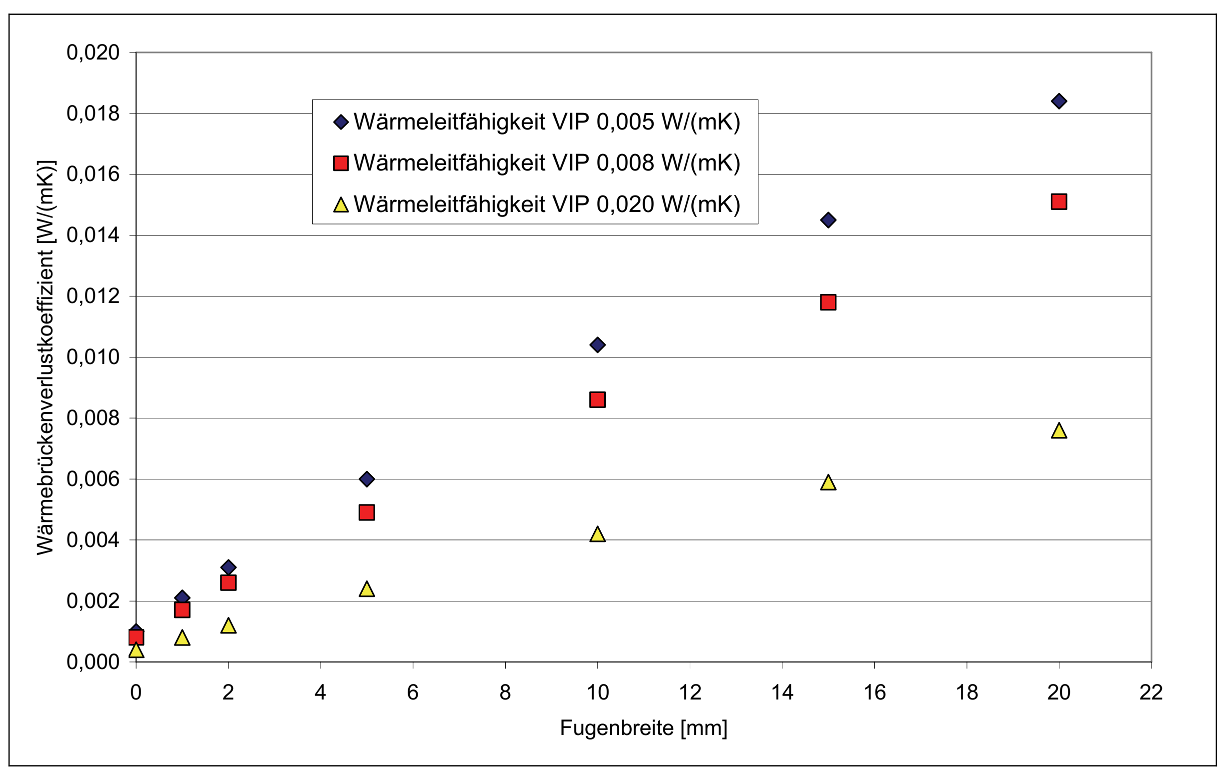


Abbildung 2.6-2: Einfluss der Fugenbreite der VIP/VIP- und GEDT/GEDT-Stöße auf den Wärmebrückenverlustkoeffizienten

VIP-VIP-Fugen

Auch bei verschwindender Fugenbreite geht der zusätzliche Wärmestrom bedingt durch die Hüllfolie der VIP nicht ganz gegen Null. Dominierend ist aber der Einfluss der Breite der Unterbrechung der Dämmung durch das Kompriband (Wärmeleitfähigkeit im komprimierten Zustand im Mittel mit 0,055 W/(mK) angesetzt). Eine erhöhte Fugenbreite durch schlechte Verarbeitung führt hier zu hohen zusätzlichen Wärmeverlusten, die die Effizienz der Wärmedämmung stark beeinträchtigen können.

Planungswert war eine Fugenbreite von 4 mm. Unter Berücksichtigung des für die U-Wert-Berechnung angesetzten Wertes der VIP-Wärmeleitfähigkeit von λ = 0,008 W/mK lässt sich aus der Abbildung durch Interpolation der Werte ein Wärmebrückenverlustkoeffizient WBV = 0,004 W/mK ermitteln. Die Gesamtlänge der VIP/VIP-Fugen innerhalb eines GEDT-Elements beläuft sich auf etwas mehr als 38 m (137 m für eine komplette Fassade). Die Wärmebrücke trägt damit pro Großelement mit 0,152 W/K zum Transmissionswärmeverlust bei. Angesichts einer Fläche des Elements von 15,5 m² beträgt der Zuschlag zum U-Wert:

ΔU = 0,01 W/m²K.

Während der Produktion wurde bei zwei GEDT-Elementen vor der Verklebung der VIPs mit den BFU-Platten die Fugenbreite gemessen. Im Mittel ergab sich ein Wert von ca. 7 mm (bei realen Fugenbreiten zwischen 0 mm und 11 mm). Da aufgrund des Überstands der Sperrholzplatten (als zusätzliche Schutzschicht im Werk) über den VIP-Rand die tatsächliche VIP-VIP-Fugenbreite nur näherungsweise bestimmt werden konnte, wird im Folgenden von einem etwas höheren Wert von 8 mm ausgegangen. Bei der Modellierung des Details im Ausführungszustand wurde weiterhin die Fuge der Sperrholzplatten berücksichtigt, die nicht mit Kompriband ausgefüllt wurde (abgeschlossener Luftraum). Unter Berücksichtung der beschriebenen Situation ergibt sich für die VIP-VIP-Fugen ein WBV von 0,0055 W/(mK), der ca. ein Drittel über dem Planungszustand liegt.

GEDT-GEDT-Fugen

Unter der Annahme, dass die Fugenbreite nach der Montage zwischen ca. 10 und 20 mm variiert, ergeben sich bei λ = 0,008 W/mK Wärmebrückenverlustkoeffizienten zwischen ca. 0,008 und 0,016 W/mK. Als Planwert für die Berechnung wurde 0,012 W/mK bei einer mittleren angestrebten Fugenbreite von 15 mm angesetzt. Bezieht man den Wert auf nur ein GEDT, so ist er jedoch zu halbieren. Nach der Montage wurden die erreichten Fugenbreiten nachgemessen und es ergab sich im Mittel eine Fugenbreite von ca. 10 mm, d. h. die Planwerte liegen hier auf der sicheren Seite. Die Gesamtlänge der Elementfugen liegt bei 16,2 m pro Fassade.

Die folgenden Tabelle zeigt die Aufschläge auf den Gesamt-U-Wert durch VIP- bzw. Elementfugen für verschiedene Wärmeleitfähigkeiten der Vakuumdämmung

Tabelle 2.6-2: Wärmebrückenaufschläge durch Fugen auf den U-Wert der Fassade

Wärmeleitfähigkeit VIP [W/(mK)]	Art der Fuge	U-Wert-Aufschlag Planungswert [W/(m²K)]	U-Wert-Aufschlag Ausführung [W/(m²K)]
0,005	VIP-VIP	0,012	0,017
	GEDT-GEDT	0,006	0,003
0,008	VIP-VIP	0,010	0,014
	GEDT-GEDT	0,005	0,002
0,020	VIP-VIP	0,005	0,006
	GEDT-GEDT	0,002	0,001

2.6.5 Wärmebrücken an den Befestigungselementen

Das Konzept der GEDT-Elemente erfordert eine Reihe von Befestigungen zwischen vorderer (BFU) und hinterer (Kerto) Tragschale. Die dafür entwickelten Befestigungsanker zur Ableitung der statischen Lasten, die die Dämmung an Stoßstellen durchdringen, stellen eine Schwächung der thermischen Hülle dar und erfordern aus diesem Grund eine detaillierte Betrachtung.

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die eingesetzten Befestigungselemente, ihren Aufbau, die energetisch wirksame Durchdringungsfläche und die Modellierung.

Tabelle 2.6-3: Übersicht der energetisch relevanten Befestigungspunkte

Bezeichnung Befestigung	Anzahl (GEDT groß)	Anzahl (GEDT klein)	Typ	Dicke [mm]	tats. Dicke [mm]	Breite [mm]	Länge [mm]	Fläche [mm²]	Anmerkungen
PGW	0	2	Schraube	M6	5,35		45	22,5	wie PW
PGr	1	1	Flacheisen	1,5	1,50	15	120	22,5	diagonal
PG	5	3	Schraube	M8	7,19		210	40,6	diagonal
PGl	2	2	Schraube	M8	7,19		210	40,6	diagonal, wie PG
PGf	0	2	Flacheisen	1,5	1,50	15	120	22,5	diagonal, wie PGr
PHW	12	11	Flacheisen	1,5	1,50	26	45	39	
PW	5	4	Schraube	M6	5,35		45	22,5	
PWf	4	4	Flacheisen	1,5	1,50	26	45	39	wie PWH
PWi	21	16	Schraube	M6	5,35		45	22,5	wie PW
PWr	5	4	Flacheisen	1,5	1,50	26	45	39	wie PWH

Die Anker bestehen im einfachsten Fall aus einer Edelstahl-Gewindestange und zwei Unterlegscheiben auf der Kerto- und der BFU-Seite bzw. einem Flacheisen am Rand der Elemente. Abhängig von den statischen Anforderungen besitzen sie unterschiedliche energetisch wirksame Querschnittsflächen, die im Folgenden untersucht werden sollen.
Die Berechnungen wurden auf Basis der Konstruktionspläne für die Befestigungselemente (Stand März 2006) mit dem 3D-Wärmebrückenprogramm Heat3 durchgeführt. Sie erfolgten mit einem Ausschnitt aus der Gesamtkonstruktion von 1,0 m x 1,0 m, in der nur der jeweilige Befestigungsanker die Dämmung stört. Bei rotationssymmetrischen Befestigungspunkten wurden die Anker durch äquivalente quadratische Anker mit gleicher Querschnittsfläche modelliert, alle anderen wurden vollständig im Modell abgebildet. Schräg durch die Dämmebene verlaufende Anker wurden als (entsprechend kürzere) gerade Anker abgebildet, so dass die Ergebnisse für diesen Ankertyp einen ungünstigeren Fall abbilden und auf der „sicheren Seite“ liegen. Bei den untersuchten Befestigungselementen überlagern sich in geringem Maß die Einflüsse des VIP-Randes und der Befestigung. Der Einfluss der Hüllfolie wurde bei diesen Berechnungen nicht mit modelliert, sondern er ist bei den VIP-VIP-Stößen berücksichtigt. Am Ende des Abschnitts werden die Veränderungen bei den Berechnungsergebnissen durch die real auf der Baustelle vorgefundene Montagesituation dargestellt.

Als Beispiel für die Modellierung der Befestigungsanker ist in Abbildung 2.6-3 das Modell es PHW-Punktes wiedergegeben. Die dargestellten Ebenen werden durch die Einzelteile des Ankers aus Edelstahl gebildet. Die obere Platte (1) liegt außen auf der BFU-Platte (zwischen 1 und 2) (18 mm dick) auf, die Platte darunter (2) ist in die BFU-Platte eingelassen. Zwischen den Platten (2) und (3) folgen von oben nach unten die Vakuumdämmung (40 mm) mit beidseitigen Schutzschichten (2,5 mm in Richtung Kerto noch mit 0,25 mm Aluminiumschicht). Platte (3) ist in die Kerto-Platte (27 mm) eingelassen und Platte (4) befindet sich wandseitig auf der Kerto-Platte. Platte (5) ist mit (1) verschweißt und an (2) gestoßen, analog ist Platte (6) mit (4) verschweißt und an (3) gestoßen. Vertikal darüber ist Platte (7) als eigentlicher Halteanker mit einer Breite von 26 mm und einer Dicke von 1,5 mm geschweißt. Alle anderen Platten besitzen eine Dicke von 3 mm. Daneben ist ein Foto des montierten Ankers zu sehen. Der PGr-Anker mit diagonalem Flachstahl am GEDT-Rand ist analog dem PHW-Anker als senkrecht zur Dämmebene modelliert, es sind jedoch die zugehörigen Dimensionen berücksichtigt.

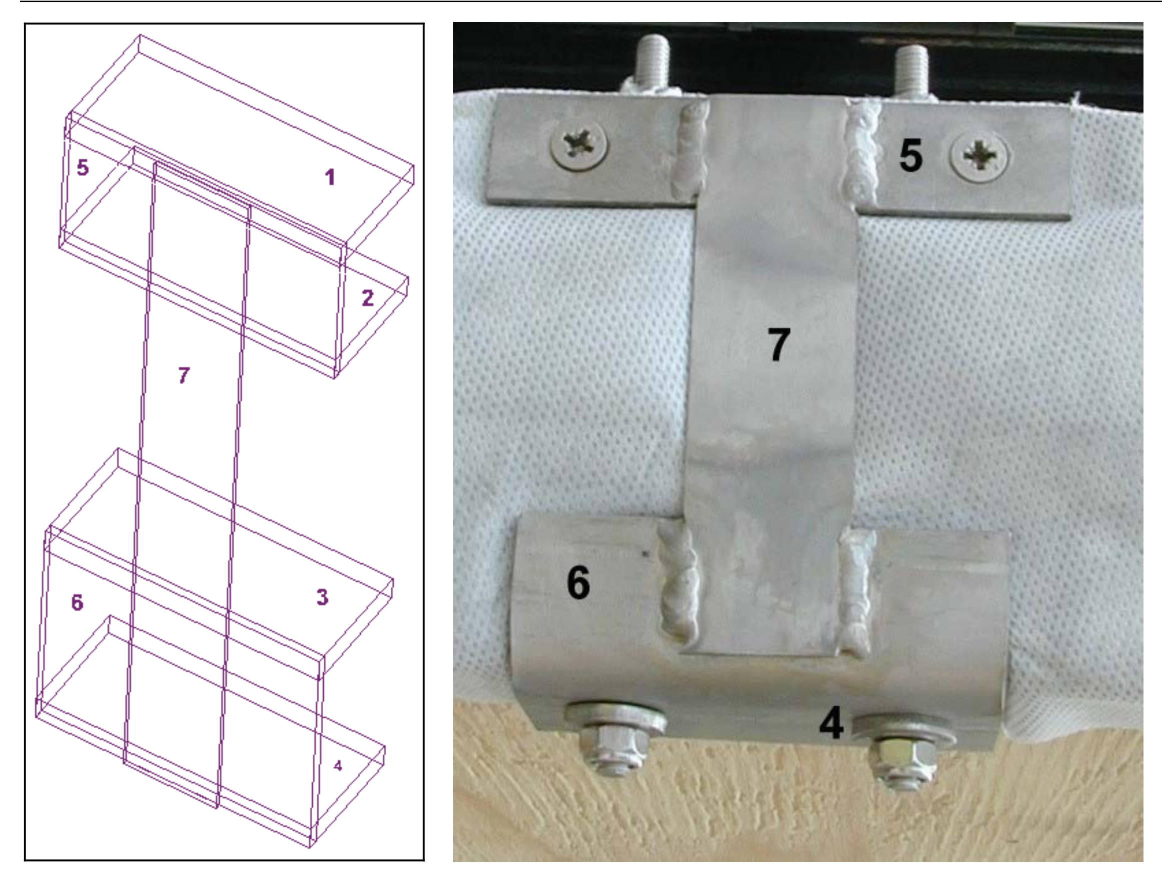


Abbildung 2.6-3: ***PHW-Punkt, links Modell, rechts Foto PHW-Punkt montiert***

Abbildung 2.6-4 zeigt das Modell eines PW-Punktes und das zugehörige Foto. Hier wurde für die Wärmebrückenberechnung wegen der vorliegenden Symmetrie nur die halbe Dicke des Schraubenquerschnitts modelliert (und die Berechnungsergebnisse später entsprechend korrigiert). Der Hohlraum, der durch die notwendige Aussparung im VIP entsteht, wurde mit Kompriband gefüllt.

Darunter ist der PG-Punkt zu sehen (Abbildung 2.6-5). Im Original besteht er aus einer schrägen Gewindestange, die aber nicht mit vertretbarem Aufwand zu modellieren ist. Aus diesem Grund wurde im 3D-Modell eine Gewindestange senkrecht zur VIP-Ebene angesetzt. Die Hohlräume zwischen den beiden Platten innen und außen sind nach der Montage mit Kerto bzw. BFU gefüllt. Zusätzlich wurde ein Luftraum mit halber Breite der Platten für die notwendigen Aussparungen berücksichtigt.

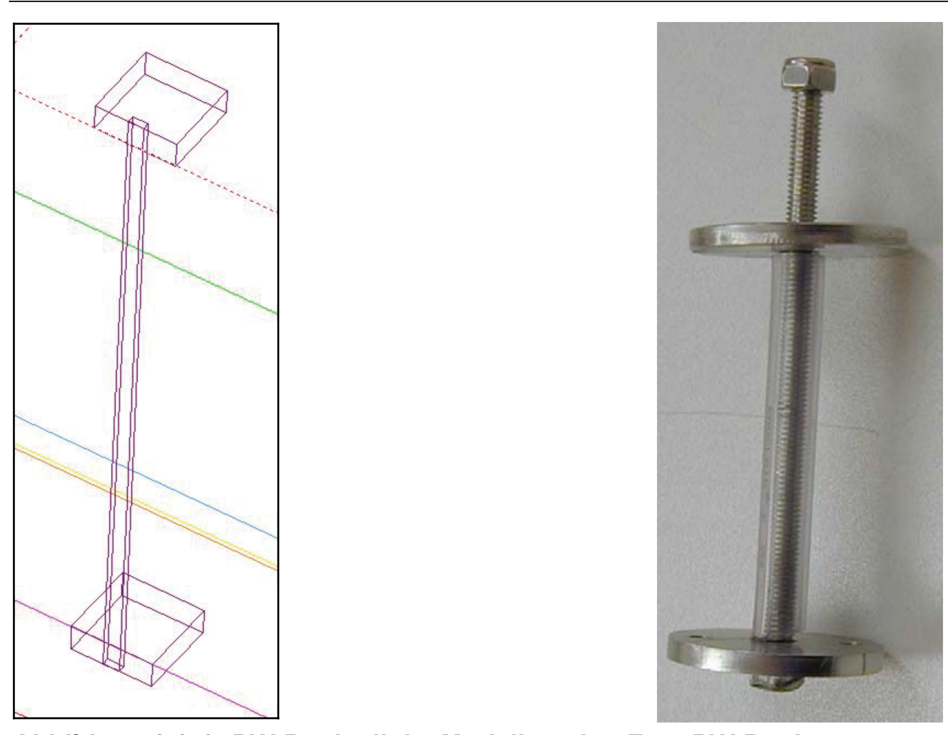


Abbildung 2.6-4: ***PW-Punkt, links Modell, rechts Foto PW-Punkt***

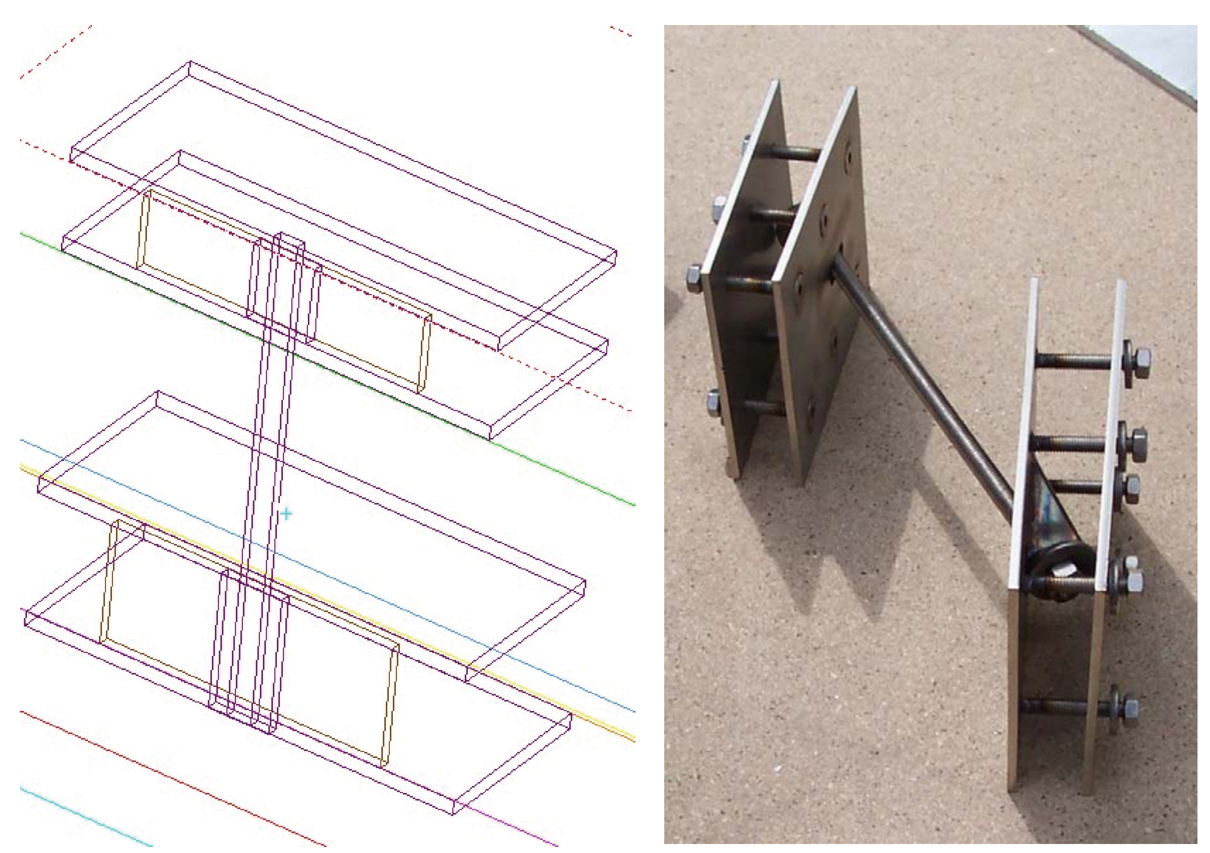


Abbildung 2.6-5: ***PG-Punkt, links Modell, rechts Foto PG-Punkt***

Grundsätzliche Betrachtung des Einflusses metallischer Durchdringungen

Die Ankerfläche hat einen großen Einfluss auf den Wärmebrückenverlustkoeffizienten (WBV), der in den folgenden Diagrammen in Milliwatt pro m² GEDT-Element und Kelvin dargestellt ist. In Abbildung 2.6-6 ist beispielhaft für Schrauben unterschiedlicher Größen (M3, M6, M12, M20) der WBV dargestellt. Diese Schrauben entsprechen in Ihrem Aufbau (mit Unterlegscheibe auf Wand- und Außenseite) exakt dem PW-Punkt (M6) bzw. dem PG-Punkt (M8). Als Randbedingungen wurde die Wärmeleitfähigkeit des VIPs mit 0,005 W/(mK) und diejenige des Ankers mit 15 W/(mK) (Edelstahl) angesetzt. Kleine Querschnitte (im Diagramm M3, M6) führen nur zu vergleichsweise geringen zusätzlichen Wärmeströmen, mit zunehmender Fläche steigt der WBV jedoch steil an (M12, M20), so dass Anker durch die Dämmschicht möglichst dünn gewählt werden sollten.

Abbildung 2.6-7 zeigt den Wärmebrückenverlustkoeffizienten in Abhängigkeit von der Wärmeleitfähigkeit des Ankers. Bei kleinen Ankerflächen verdreifacht sich die Wärmebrückenwirkung beim Übergang von Edelstahl (λ= 15 W/(mK)) auf Stahl (λ= 60 W/(mK)). Aluminium (λ= 160 W/(mK)) verfünffacht den WBV. Bei dickeren Ankern fällt dieser Anstieg prozentual gesehen weniger drastisch aus, aber auch hier ist die Verwendung hochwertiger Stähle mit niedriger Wärmeleitfähigkeit unbedingt erforderlich. Die Punkte im Bereich von 5 bzw. 1 W/(mK) sind hypothetisch: Sollte es zukünftig möglich sein den Edelstahl durch hochfeste Materialien geringerer Wärmeleitfähigkeit zu ersetzen, so könnte der Einfluss der Befestigungsanker – besonders bei großen Querschnitten - weiter reduziert werden.

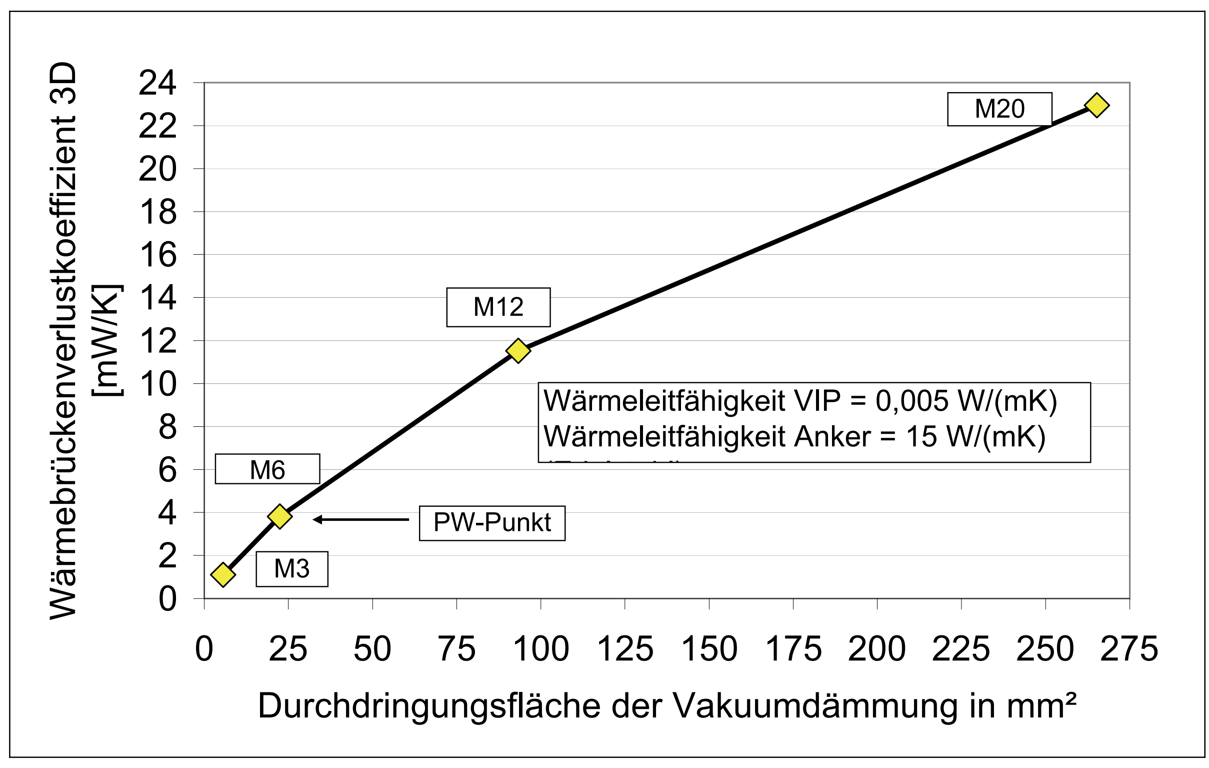


Abbildung 2.6-6: Einfluss der Durchdringungsfläche auf den Wärmebrückenverlustkoeffizient (PW entspricht M6)

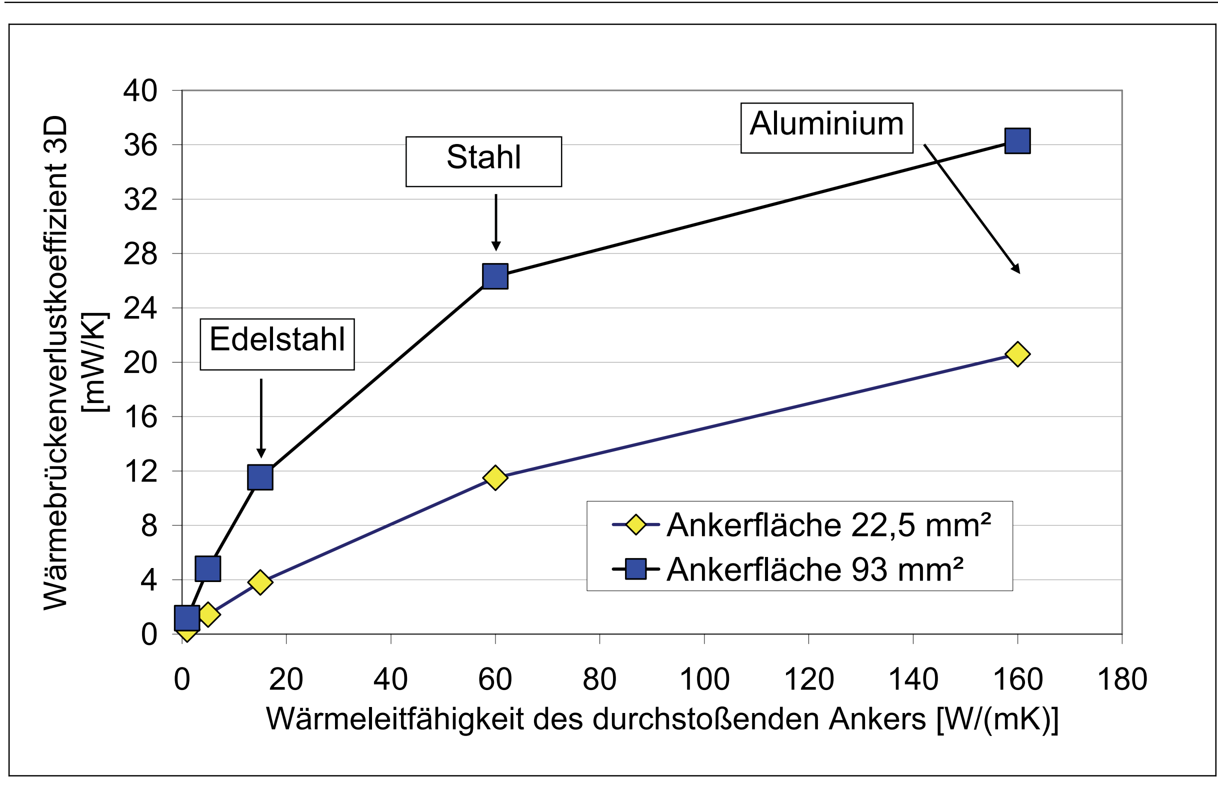


Abbildung 2.6-7: Einfluss der Wärmeleitfähigkeit des durchstoßenden Ankers auf den Wärmebrückenverlustkoeffizient .

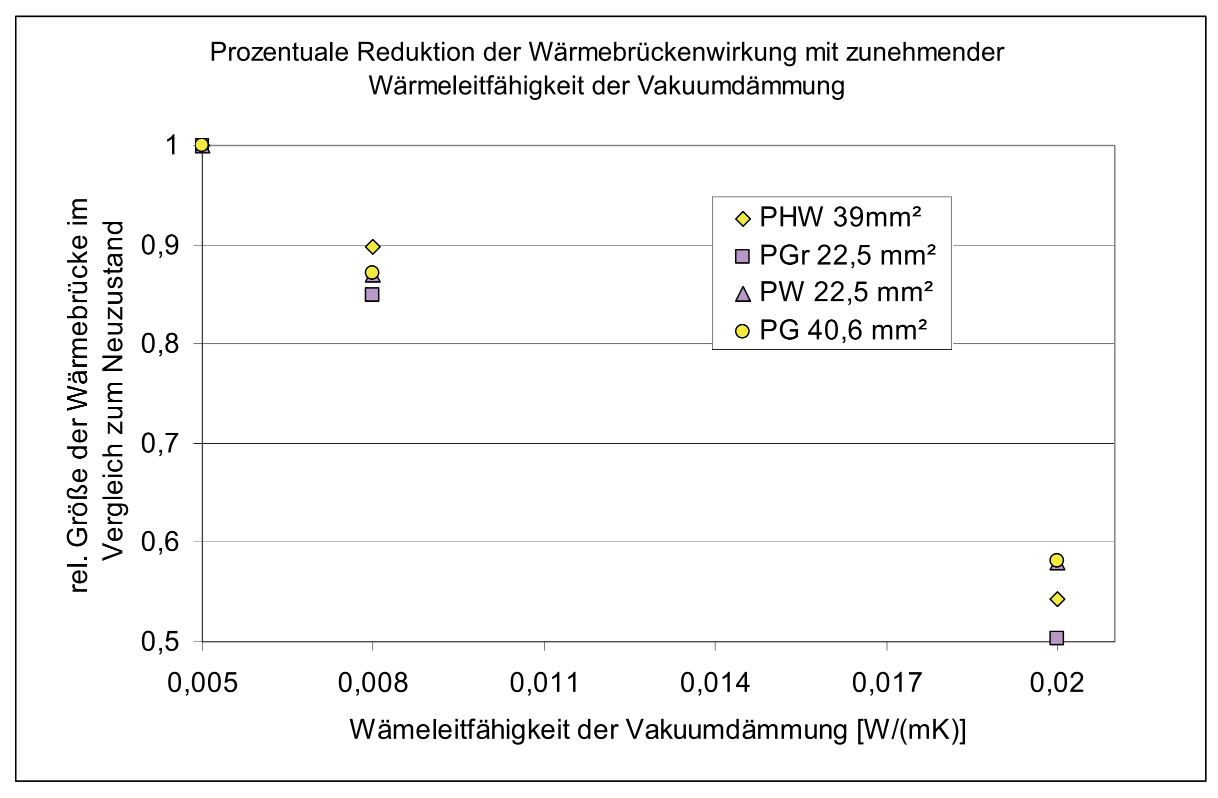


Abbildung 2.6-8: Prozentuale Reduktion der Wärmebrückenwirkung punktförmiger Anker durch Zunahme der Wärmeleitung im VIP

Auch die Wärmeleitfähigkeit der VIP-Paneele wirkt sich auf den WBV am Anker aus. Im Vergleich zum fabrikneuen Zustand (Wärmeleitfähigkeit λ = 0,005 W/mK) sinkt der WBV bei einer Wärmeleitfähigkeit von 0,008 W/(mK) um ca. 20 % (über die Wärmebrücken am Anker

entweicht weniger zusätzliche Wärme), bei einem defekten VIP (λ = 0,020 W/mK) um 40 % – 50 % (Abbildung 2.6-8). Dieser Effekt kompensiert bei Konstruktionen mit unvermeidlichen Wärmebrücken ein wenig den Anstieg der Wärmeleitfähigkeit der VIPs.

Berechnung der Wärmebrückeneffekte an den GEDT-Elementen

Die gesamte Ankerfläche je Element liegt bei den großen (unteren) GEDTs bei 17,1 cm² (entsprechend 1,1 cm² pro m² GEDT), bei den kleineren (oberen) GEDTs bei 15,1 cm² (oder 1,2 cm² pro m² GEDT). Für eine komplette Fassade summiert sich die metallische Durchdringungsfläche auf 64,3 cm² verteilt auf 208 Einzelelemente.

Tabelle 2.6-4: Zusammenstellung der Befestigungselemente und der energetischen Auswirkungen

Bezeichnung Befestigung	Anzahl (GEDT groß)	Anzahl (GEDT klein)	WBV für λ=0,005 W/(mK) [mW/K]	WBV für λ=0,008 W/(mK) [mW/K]	WBV für λ=0,020 W/(mK) [mW/K]	ΔU GEDT groß [W(m²K)]	ΔU GEDT klein [W(m²K)]
PGW	0	2	3,8	3,3	2,2	0,0000	0,0006
PGr	1	1	8,7	7,3	4,4	0,0005	0,0007
PG	5	3	7,2	6,3	4,2	0,0020	0,0017
PG (wie Baustelle)			18,0	14,9	7,8	0,0048	0,0040
PGl	2	2	7,2	6,3	4,2	0,0008	0,0011
PGl (wie Baustelle)			18,0	14,9	7,8	0,0019	0,0019
PGf	0	2	8,7	7,3	4,4	0,0000	0,0013
PGz			0,0	0,0	0,0	0,0000	0,0000
PHW	12	11	11,2	10,0	6,1	0,0077	0,0099
PW	5	4	3,8	3,3	2,2	0,0011	0,0012
PWf	4	4	11,2	10,0	6,1	0,0026	0,0036
PWi	21	16	3,8	3,3	2,2	0,0045	0,0048
PWr	5	4	11,2	10,0	6,1	0,0032	0,0036
Summe	55	49				0,0224	0,0285
					Ausführung wie auf Baustelle	0,0263	0,0316

In Tabelle 2.2-1 sind die Ergebnisse der Wärmebrückenberechnungen der Befestigungsanker für die GEDT-Elemente bei unterschiedlicher Wärmeleitfähigkeit der Vakuumdämmpaneele zusammengestellt.

Bei einem großen GEDT-Element (15,5 m²) ergibt sich durch die Befestigungsanker ein Aufschlag auf den ungestörten U-Wert von 0,0224 W/(m²K), bei einem kleinen Element (11,1 m²) von 0,0285 W/(m²K).

Die reale Ausführung der im Element liegenden Anker (PG und PW) weicht von den Planzeichnungen teilweise ab. Hier ist besonders die Breite der Aussparung der VIPs für die Ankerdurchführung zu nennen (siehe Abbildung 2.6-9). Im Regelfall war am PG-Punkt eine ca. 2 cm breite und 20 cm lange Fuge vorhanden. Dieser Hohlraum wurde vor dem Verkleben der Schichten mit PUR-Schaum ausgefüllt. Berücksichtigt man diese Ausführung im Wärmebrückenmodell, ergibt sich je nach Wärmeleitfähigkeit der VIPs etwa eine Verdoppelung des WBV. Der Aufschlag auf den U-Wert eines Elementes erhöht sich dadurch bei einem großen GEDT um 17 %, bei einem kleinen um 11 %. Für das gesamte Gebäude in Hofheim erhöhen sich die Wärmeverluste um ca. 20 kWh/a.

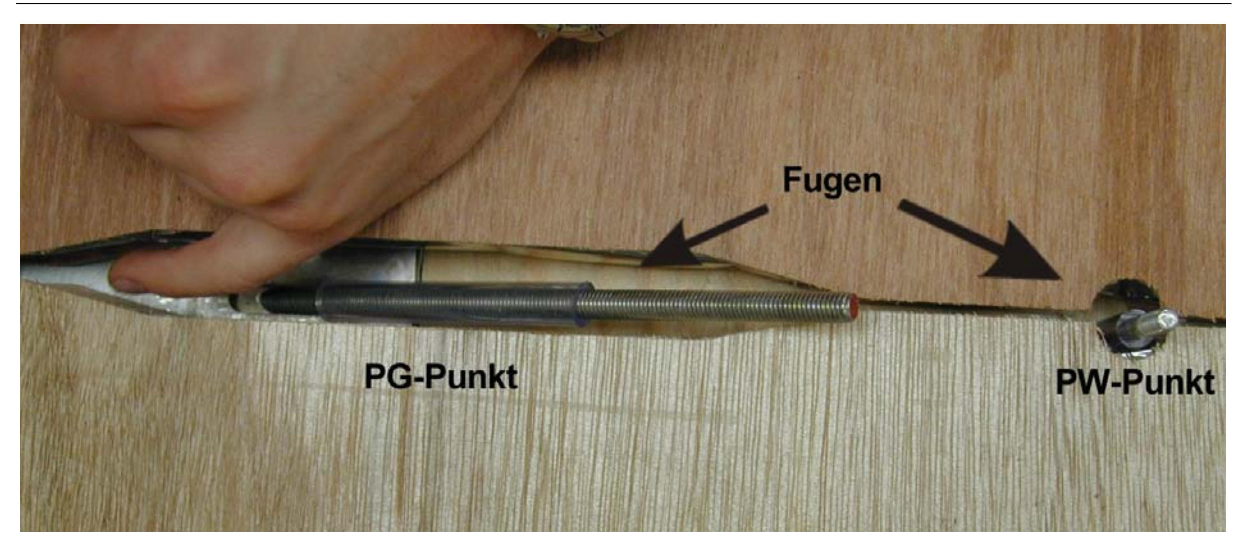


Abbildung 2.6-9: **Fuge an PG und PW-Punkt vor dem Ausschäumen mit PUR**

Beim PW-Punkt (und den zugehörigen vergleichbaren Punkten) befand sich um den Gewindestab herum in der Planungsphase eine Fuge von 2 mm, bei der Montage wurde jedoch eine nahezu runde Aussparung mit 2 cm Durchmesser ermittelt. Berücksichtigt man diese Änderungen, ergibt sich jedoch nur eine Erhöhung des WBV von weniger als 0,1 mW/(mK), man liegt somit im Rundungsbereich.

Bei allen dargestellten Wärmebrückenberechnungen wurde die mittlere Dicke der Ausgleichsdämmung mit 2 cm angesetzt. Bei der Montage zeigte sich, dass die Altfassaden der Gebäude vergleichsweise eben sind, die Ausgleichsdämmung daher nicht oder nur an wenigen Punkten stark zusammengepresst wird und daher ihre Dicke eher mit 3 - 4 cm angesetzt werden kann. Um die Auswirkungen der stärkeren Ausgleichsdämmung zu überprüfen, wurde das ungünstigste Detail (PG-Punkt mit Ausführung wie vorgefunden) bei einer Wärmeleitfähigkeit des VIPs von 0,005 W/(mK) und 4 cm Ausgleichsdämmung berechnet. Der Wärmeverlust reduziert sich an diesem Anker von 14,93 auf 10,86 mW/(mK) (28 %). Diese nennenswerte Reduktion der Wärmebrücken tritt jedoch nur auf, wenn im Bereich des Ankers die Dämmdicke von 4 cm tatsächlich erreicht wird, was aber nicht überprüft werden kann. Aus diesem Grund wird im folgenden Kapitel der Gesamt-U-Wert der Konstruktion mit den Wärmebrückenverlustkoeffizienten für 2 cm Ausgleichsdämmung betrachtet, der ungestörte Aufbau zur Veranschaulichung auch mit 4 cm Ausgleichsdämmung dargestellt.

2.6.6 Zusammenfassung: Wärmedurchgangskoeffizient des GEDT-Elements

2.6.6.1 Planwerte

Der effektive Gesamt-U-Wert der GEDT-Elemente kann nun unter Berücksichtigung der oben dargestellten Wärmebrücken bestimmt werden. Die vorgefertigten Dämmelemente mit Vakuumdämmung erreichen ohne Berücksichtigung der Wärmebrücken und mit fabrikneuen, 4 cm starken VIPs einen U-Wert von 0,115 W/(m²K), unter Berücksichtigung der Altbauwand und 3 cm Ausgleichsdämmschicht 0,102 W/(m²K). Durch die Planungswerte der Wärmebrücken an den VIP-Rändern und -Stößen, den GEDT-Stößen und den Ankern erhöht sich der Gesamt-U-Wert jedoch auf 0,145 W/(m²K) für ein großes GEDT (15,5 m²) bzw. 0,155 (W/m²K) für ein kleines GEDT (11,10 m²) (siehe folgende Abbildung 2.6-10 und Tabelle 2.2-1). Die Wärmebrücken durch Anker, VIP/VIP- und GEDT/GEDT-Stöße belaufen sich auf ca. 30 % bzw. 34 % vom Gesamt-U-Wert (21 % punktförmige Wärmebrücken (Anker), 12 % linienförmige Wärmebrücken (Stöße)). Trotz metallischer Anker durch die Dämmebene kann mit der Großelement-Dämmtechnik ein sehr guter U-Wert bei der energetischen Altbausanierung erreicht werden. Der Mittelwert für eine gesamte Fassade inklusive der Füll-GEDT liegt bei 0,150 W/(m²K), Fenster und Anschlüsse sind dabei in der Gebäudebilanz und nicht beim GEDT berücksichtigt.

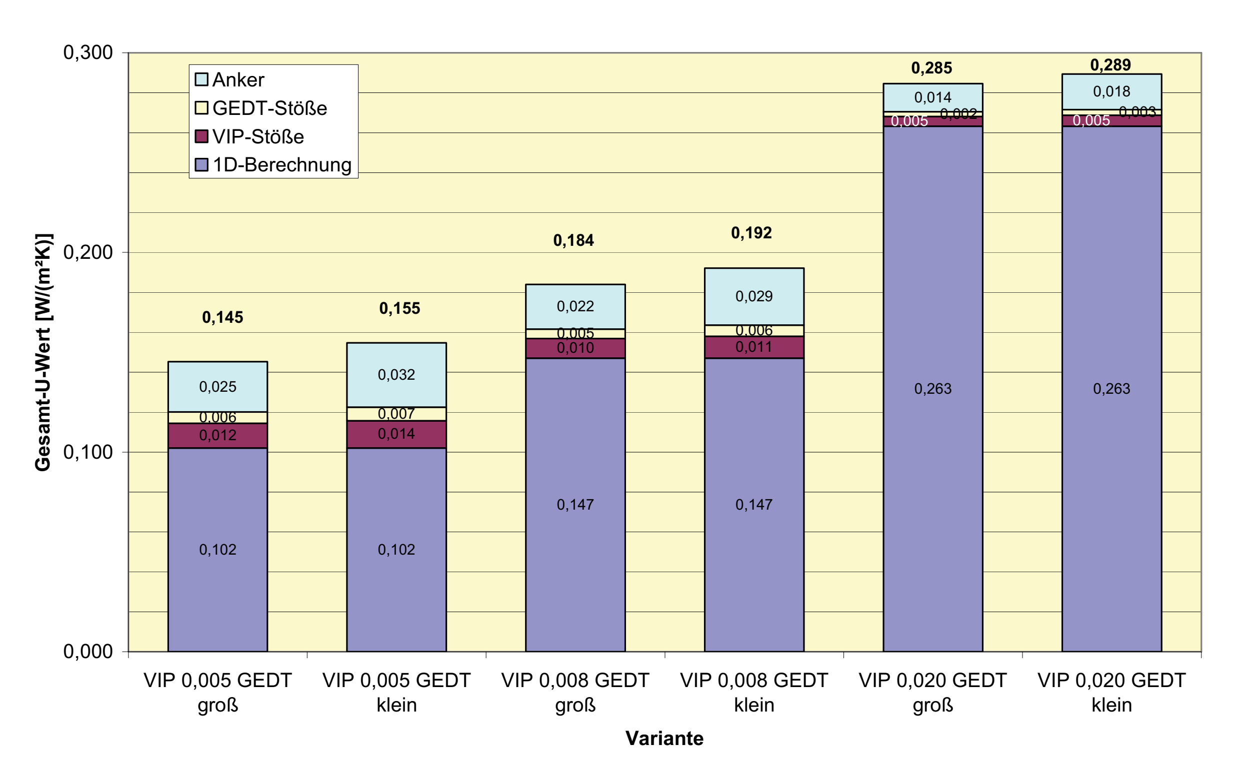


Abbildung 2.6-10: Vergleich der Gesamt-U-Werte des GEDT-Elements für unterschiedliche Wärmeleitfähigkeit der Vakuumdämmung

Durch Alterung wird die Wärmeleitfähigkeit der VIPs ansteigen. Gleichzeitig sinkt der Einfluss der Wärmebrücken geringfügig, so dass sich bei einer Wärmeleitfähigkeit von 0,008 W/(mK) ein Gesamt-U-Wert von 0,188 W/(m²K) für die Gesamtfassade ergibt (inklusive Füll-GEDT). Innerhalb welcher Zeit mit dieser Verschlechterung zu rechnen ist, kann bisher nur schwer abgeschätzt werden, es handelt sich aber bei normaler Qualität der VIPs voraussichtlich um

mehrere Jahrzehnte. Die Berechnungsergebnisse für eine Wärmeleitfähigkeit von 0,008 W/(mK) stellen somit nicht den langjährigen Mittelwert über die Lebensdauer dar, sondern einen Endwert bei einer definierten „technischen“ Lebensdauer, der aber mit dem Bemessungswert, der in Bilanzberechnungen eingesetzt werden muss, nahezu identisch ist. Die VIPs bieten über viele Jahre und Jahrzehnte deutlich bessere Werte. Insoweit sind die Ergebnisse für den Gesamt-U-Wert, die im Folgenden meist für die Wärmeleitfähigkeit von 0,008 W/(mK) angegeben werden, konservative Abschätzungen, die jedoch z. B. bei der Planung der Anlagentechnik einfließen müssen, damit die Gebäude auch nach Jahrzehnten noch ausreichend beheizt werden können.

Da Vakuumdämmplatten sehr empfindlich gegen mechanische Beschädigungen sind und auch durch Alterung ein Versagen der Hüllfolie möglich ist, sei hier noch der unwahrscheinliche Fall einer vollständigen Belüftung aller Vakuumpaneele (62 Stück) in allen GEDTs einer Fassade aufgelistet. Durch einen solchen „Totalausfall“ würde sich der Gesamt-U-Wert auf ca. 0,287 W/(m²K) erhöhen. Die aktuellen Anforderungen der Energieeinsparverordnung für die Dämmung von Altwänden (U = 0,35 W/m²K) würden damit zwar immer noch eingehalten, der angestrebte Energieverbrauch des Hauses würde sich jedoch deutlich erhöhen.

Tabelle 2.6-5: Anteile am Gesamt-U-Wert in Abhängigkeit von VIP-Eigenschaften und GEDT-Größe

	λ_{VIP}=0,005 W/(mK), GEDT groß	λ_{VIP}=0,005 W/(mK), GEDT klein	λ_{VIP}=0,008 W/(mK), GEDT groß	λ_{VIP}=0,008 W/(mK), GEDT klein	λ_{VIP}=0,020 W/(mK), GEDT groß	λ_{VIP}=0,020 W/(mK), GEDT klein
1D-Berechnung	0,102	0,102	0,147	0,147	0,263	0,263
ΔU VIP-Stöße	0,012	0,014	0,010	0,011	0,005	0,005
ΔU GEDT-Stöße	0,006	0,007	0,005	0,006	0,002	0,003
ΔU Anker	0,025	0,032	0,022	0,029	0,014	0,018
Gesamt-U-Wert	0,145	0,155	0,184	0,192	0,285	0,289

2.6.6.2 Tatsächliche Werte unter Berücksichtigung der Bauausführung

<u>Einfluss der Fugenbreite</u>

Die Ausführungsqualität bei Herstellung und Montage der GEDT-Elemente beeinflusst auch den Gesamt-U-Wert. Eine Berechnung mit Fugenbreiten bei VIP-VIP-Stoß von 4 mm und beim GEDT-GEDT-Stoß von 15 mm (Ausführung wie geplant), ergibt für ein kleines Element den U-Wert von 0,192 W/(m²K) (bei λ=0,008 W/(mK)). Wäre es im Mittel aller Fugen gelungen, deren Breite bei VIP-VIP-Stößen auf 1 mm und bei GEDT-GEDT-Stößen auf 10 mm zu begrenzen („optimale Ausführung“), wäre der sich ergebende U-Wert leicht auf 0,185 W/(m²K) gesunken. Entstehen dagegen größere Fugenbreiten (VIP-VIP 6 mm und GEDT-GEDT 20 mm), so steigt der U-Wert auf 0,199 W/(m²K) an („ungünstige Ausführung“). Die Ausführungsqualität beeinflusst somit auch die zu erreichende energetische Effizienz.

Die Ausführung, wie sie tatsächlich in Hofheim realisiert wurde, lässt sich folgender Maßen beschreiben: Die mittlere VIP-VIP-Fugenbreite liegt bei 8 mm, die GEDT-GEDT-Fugenbreite bei 10 mm. Damit ergibt sich ein Gesamt-U-Wert des kleinen Elementes von 0,198 W/(m²K). Für die gesamte Fassade ergibt sich ein U-Wert von 0,192 W/(m²K), d. h. eine Verschlechterung von 2 %.

Einfluss zusätzlicher Anker

Bei der Montage mussten, anders als geplant, an mehreren Stellen zusätzliche Anker gesetzt werden (siehe Kapitel 3.3). Diese ähneln im Prinzip dem PW-Punkt und wurden nach einem vergleichbaren Verfahren modelliert. Allerdings reichen sie von der BFU-Platte durch die Ausgleichsdämmung hindurch bis in die Bestandswand, die Situation ist also wärmetechnisch ungünstiger. Der Wärmebrückenaufschlag für jeden zusätzlichen Anker liegt bei 0,005 W/(m²K) (bei λ=0,008 W/(mK)). Dabei wurde berücksichtigt, dass die Wärmebrückenwirkung durch Aufbringen einer 1 cm dicken PE-Schaum-Abdeckung (quadratisch 10 cm x 10 cm) abgemindert werden konnte.

Einfluss der Füllelemente

Zusätzlich zu den großflächigen GEDT-Fassadenelementen werden nun auch die Füll-GEDT-Elemente berücksichtigt, die den oberen Abschluss zwischen GEDT-Fassade und Traufe bilden. Diese waren erforderlich, um einen Arbeitsraum für die GEDT-Montage zu erhalten. Bedingt durch die geringe Höhe von ca. 25 cm und die dadurch erforderliche Unterteilung auf 6 Füllelemente auf eine Fassade entstehen vergleichsweise lange GEDT-GEDT-Fugen, die den U-Wert merklich vergrößern. Ein Füll-GEDT erreicht bei einer Wärmeleitfähigkeit der Vakuumdämmung von 0,008 W/(mK) einen U-Wert von 0,204 W/(m²K).

Rechnet man die Planwerte der GEDT-Elemente einer Fassade zusammen (2 große, 2 kleine, 6 Füll-Elemente) ergibt sich ein mittlerer U-Wert von 0,188 W/(m²K). In fabrikneuem Zustand liegt der mittlere U-Wert bei 0,150 W/(m²K).

2.6.6.3 Überblick: Gesamt-U-Werte

Die folgende Abbildung 2.6-11 gibt einen Überblick über die Planwerte und die tatsächlich erreichten U-Werte der GEDT-Fassaden. Letztere berücksichtigen die bei der Ausführung gemessenen Fugenbreiten, die zusätzlichen Anker in den Elementfugen und die Füllelemente. Die Fenster der Großelemente sind in den angegebenen U-Werten nicht berücksichtigt, d. h. die U-Werte beziehen sich auf die Fassadenfläche ohne Fenster (im Fall der Planwerte auch ohne Fläche der Füll-GEDT).

Es werden wiederum getrennte Werte für die Wärmeleitfähigkeiten 0,005 W/mK (fabrikneu), 0,008 W/mK (nach Alterung) und 0,02 W/mK (Vakuum zerstört) angegeben.

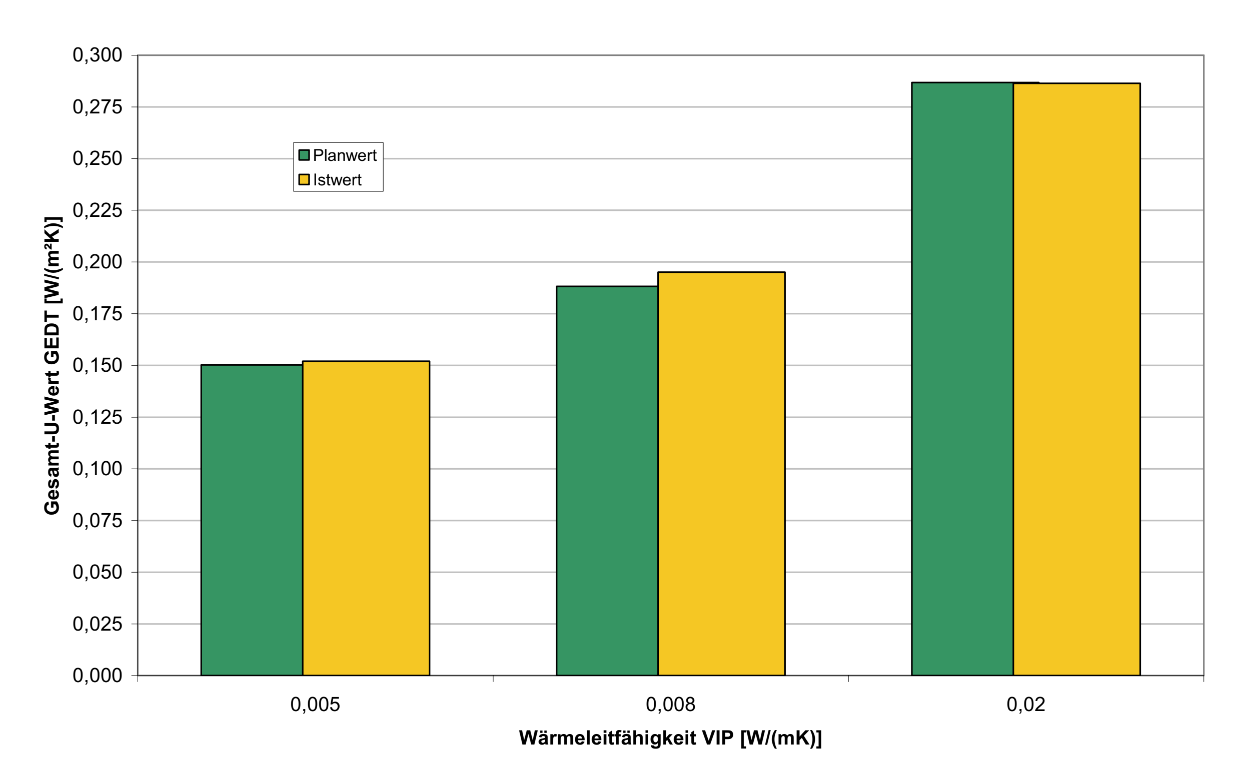


Abbildung 2.6-11: Vergleich von Plan- und Istwerten des Gesamt-U-Wertes der GEDT

Die Berechnungsblätter der Wärmedurchgangskoeffizienten für die GEDT-Elemente sind im Anhang III dokumentiert.

2.6.7 Wärmebrücken an den Anschlüssen des GEDT-Elements

Zusätzliche Wärmebrücken treten an den Anschlüssen der GEDT-Elemente an die Nachbarbauteile auf (z. B. an Perimeterdämmung oder Fenster). Diese Situationen waren, bedingt durch die besonderen Eigenschaften der Vakuumdämmung, nicht immer einfach zu lösen. Analog dem üblichen Vorgehen, dass solche Anschlüsse nicht dem einzelnen Bauteil sondern der Energiebilanz des gesamten Gebäudes zugerechnet werden, werden die im Folgenden dokumentierten Wärmebrückenzuschläge nicht mehr zu den oben angegebenen U-Werten der GEDT-Elemente addiert, sondern bei der Gesamt-Energiebilanzberechnung für die Gebäude separat berücksichtigt[3].

2.6.7.1 GEDT an Fenster

Für die Einbindung von Fenstern in eine Vakuumdämmung sind mehrere Besonderheiten zu beachten:

- Die Ansichtsbreite des (passivhaus-geeigneten) Fensterrahmens beträgt inklusive Aluminiumdeckschale ca. 120 mm (110 mm ohne Aluminiumabdeckung), während das GEDT-Element nur eine Stärke von 90 mm aufweist, d. h. der Fensterrahmen muss über das Element überstehen,
- die bei konventionellen Dämmstoffen im Altbau üblichen Regeln für die Rahmenüberdämmung gelten so nicht.

Zur grundsätzlichen Abklärung der optimalen Einbaulage des Fensters in das GEDT-Element wurden zahlreiche Analysen durchgeführt. Nicht alle berechneten Varianten sind

[3] Dies wird im Rahmen des für 2008 geplanten Gesamtberichts zum Modernisierungsvorhabens erfolgen.

baupraktisch realisierbar – sie sollen aber grundsätzliche Abhängigkeiten bei der Einbausituation erläutern. Als Fenster wurde immer das Holz-Aluminium-Fenster mit 3-fach-Wärmeschutzverglasung (Passivhausfenster) modelliert, das auch in die GEDT-Elemente eingebaut wurde.
Bei den Berechnungen wurde das Fenster ausgehend von einer Anordnung in der Dämmebene GEDT (mittig über VIP) in Richtung der Wand verschoben. Der Versatz der Dämmebene des Fensters (äußerer Rand des PU-Dämmkerns) zum äußeren Rand der Dämmebene des GEDT-Elements wurde in der folgenden Abbildung 2.6-12 aufgetragen.

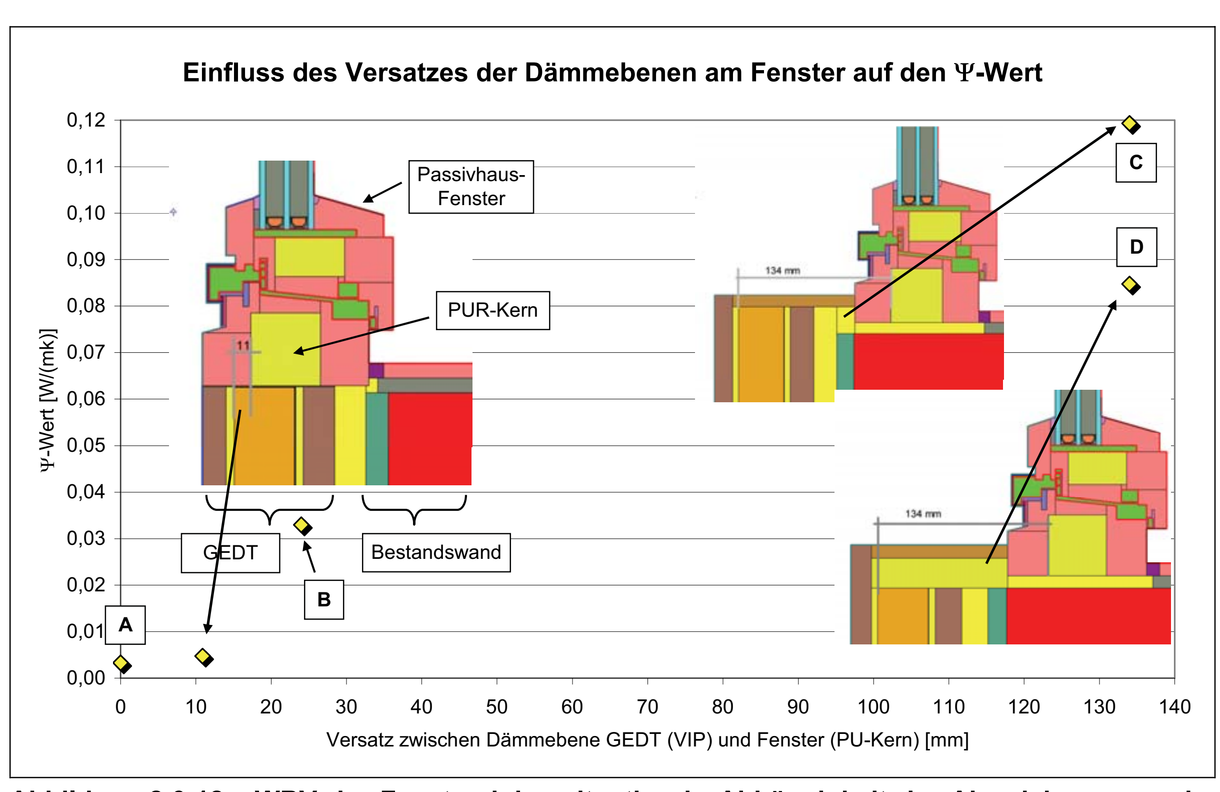


Abbildung 2.6-12: WBV der Fenstereinbausituation in Abhängigkeit der Abweichung aus der VIP-Ebene

Für die vorgefertigten Dämmelemente ergibt sich energetisch eine deutlich bessere Einbausituation, wenn VIP- und Fensterebene fließend ineinander übergehen bzw. der Versatz der Dämmebenen gering bleibt. Hier muss jedoch aufgrund der Ansichtsbreite des Fensters auf die praktische Realisierbarkeit geachtet werden. Ungünstiger schneidet eine Überdämmung des Fensters durch das VIP ab. Gründe sind das Zusammenwirken von geringer Stärke der Dämmebene von 4 cm und die hohe Wärmeleitung in der Hüllfolie. Beim hier untersuchten GEDT-Aufbau wird die Situation durch die Aluminiumschutzschicht auf der warmen Seite des VIPs nochmals verschärft. Der Wärmebrückenverlustkoeffizient liegt für die Variante des Fenstereinbaus in die Leibung um das Zehnfache über der optimalen Variante (Isothermendarstellungen verschiedener Varianten befinden sich im Anhang III).

Für die tatsächlich umgesetzte Variante, bei der der Fensterrahmen innenbündig mit dem GEDT montiert wird um Kollisionen während der Montage zu vermeiden, ergibt sich ein Wärmebrückenaufschlag von 0,004 W/(mK) im Mittel über die umlaufenden Anschlüsse. Bedingt durch die vier vergleichsweise kleinen (1,46 m x 1,02 m) Fenster einer Nordfassade liegt der Aufschlag auf die Energiebilanz des gesamten Gebäudes bei nur 0,079 W/K.

Abbildung 2.6-13 zeigt die Isothermendarstellung für die ausgeführte Variante des unteren Anschlusses des Fensters.

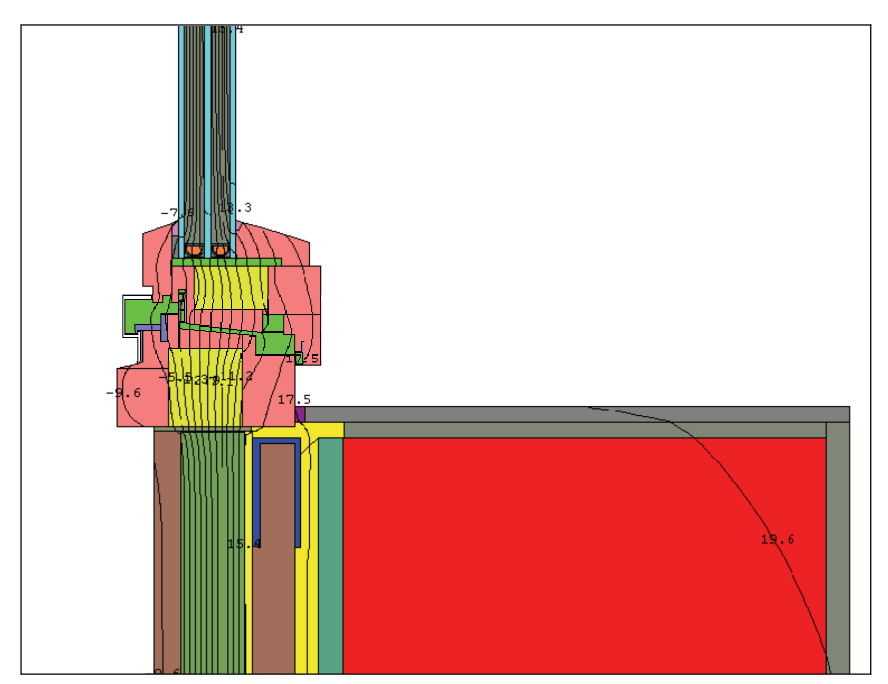


Abbildung 2.6-13: Unterer Anschluss des Fensters an das GEDT-Element

2.6.7.2 GEDT an WDVS - Eckanbindung

Auch die Anbindung des Dämmelements an ein sich anschließendes Wärmedämmverbundsystem (WDVS) ist aufgrund der Dickenunterschiede der Dämmung (von 4 auf 20 cm) nicht trivial. Ebenso muss der Randabschluss der GEDT-Elemente betrachtet werden. Es wurden für das Energiesparhaus 40 (ESH 40) und den EnEV-Neubau-Standard verschiedene Varianten der VIP-Länge und der Aluplatte untersucht. In einer frühen Planungsphase angedachte Randausbildungen mit seitlichen Ankern wurden zugunsten eines flächigen Kantholzes im kalten Bereich verworfen (s. Abbildung 2.6-15). Dadurch wird der Produktionsprozess deutlich vereinfacht.

Abbildung 2.6-14 zeigt für das EnEV-Neubau-Haus und für das ESH 40 die Isothermendarstellung der Varianten, die an den GEDT-Elementen realisiert wurden.

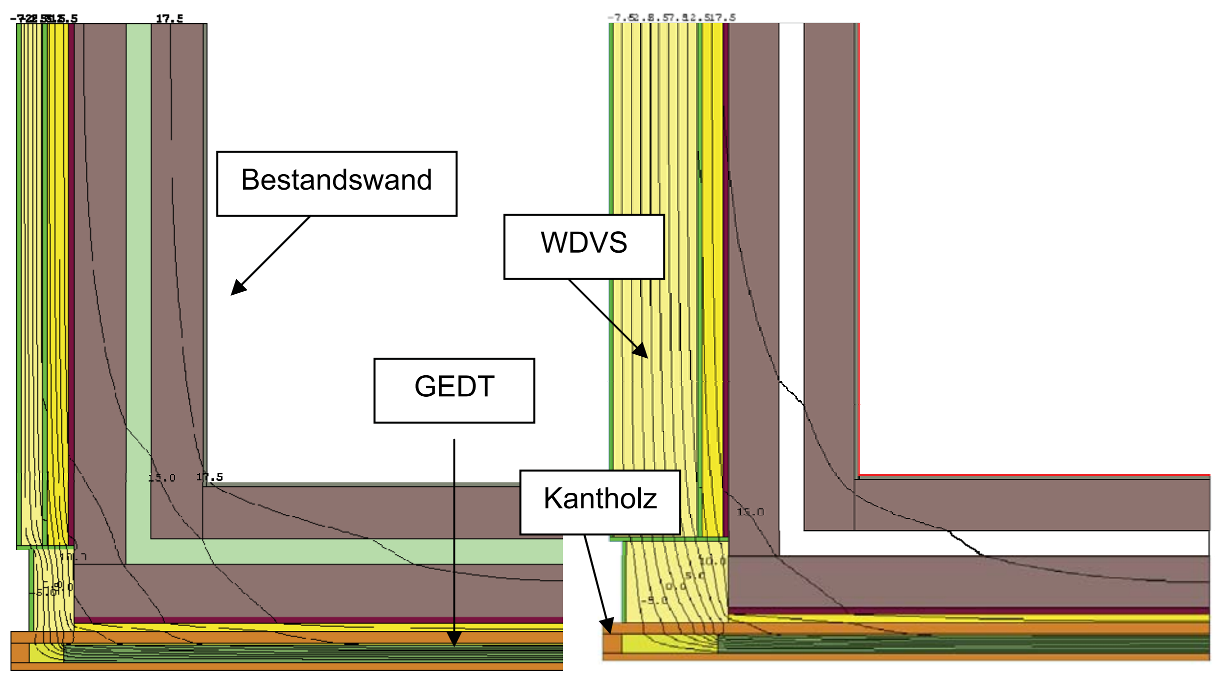


Abbildung 2.6-14: Ecke GEDT-WDVS für EnEV-Neubau-Haus: VIP nur bis knapp über Altwand, Rest mit PUR-Dämmung ausgefüllt; Ψ_a-Wert = 0,000 W/(m²K)

Abbildung 2.6-15: Ecke GEDT-WDVS für das ESH40: VIP nur bis knapp über Altwand, Rest mit PUR-Dämmung ausgefüllt; Ψ_a-Wert = -0,021 W/(m²K)

Üblicherweise stellt eine Gebäudeecke eine geometrische Wärmebrücke mit (außenmaßbezogen) negativem Ψ-Wert dar. Die Gebäudeecke mit WDVS (ohne GEDT) erreicht beim EnEV-Neubau-Standard einen Ψ-Wert von -0,07 W/(mK) und beim ESH 40 einen Ψ-Wert von -0,055 W/(mK). Durch die Kombination von GEDT und WDVS wird die Situation verschlechtert, so dass es im optimalen Fall für das EnEV-Neubau-Haus nur noch gelingt, einen Ψ-Wert von 0,000 W/(mK) zu erreichen. Beim ESH 40-Haus bleibt der außenmaßbezogene Ψ-Wert mit -0,021 W/(mK) immer noch im negativen Bereich.

Die Wärmebrückenwirkung wurde in Abhängigkeit von der Länge des VIP-Überstandes über die Außenkante der Altwand für das EnEV-Gebäude und für das ESH 40 untersucht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 2.6-16 dargestellt.

Bei der EnEV-Variante des Gebäudes zeigt sich, dass es hier besser ist, nur einen geringen Überstand der VIPs über die Althauswand zu realisieren, da der WBV schnell mit zunehmender Entfernung von der Gebäudekante ansteigt. Beim ESH40 ist der Einfluss des Überstandes (in dem hier betrachteten Bereich) vernachlässigbar. Vor diesem Hintergrund und im Sinne einer einheitlichen Lösung für alle Gebäude wurde für alle GEDT-Elemente ein einheitlicher Überstand von 10 mm über die unverputzte Althauswand gewählt. Im Anhang III sind weitere Berechnungen zur Gebäudeecke am GEDT dokumentiert.

Es wurde die folgende praktische Ausführung gewählt: VIP und Sperrholz werden mit Alu bis zum alten WDVS geführt, der verbleibende Hohlraum wird dann mit PUR-Dämmung gefüllt (siehe Abbildung 2.6-17).

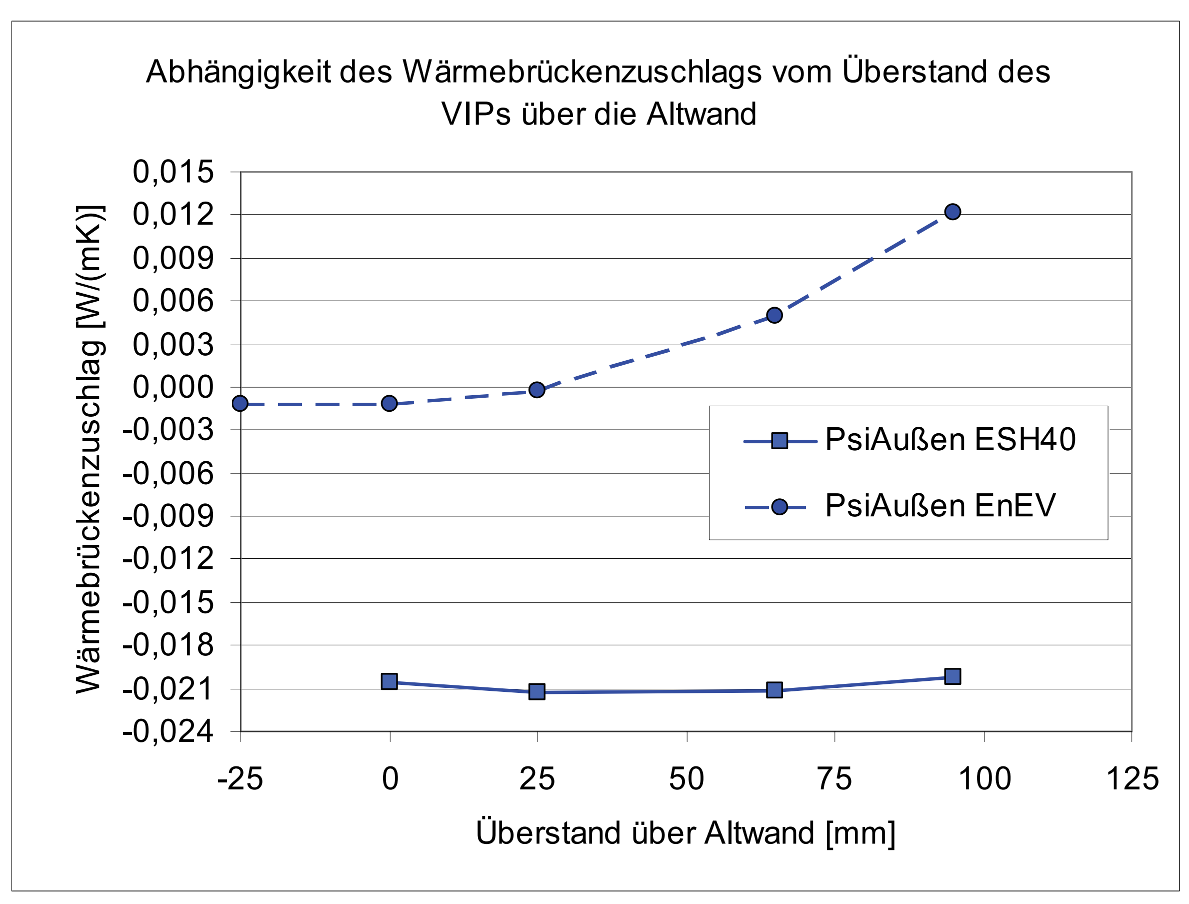


Abbildung 2.6-16: Wärmebrückenzuschlag in Abhängigkeit des VIP-Überstandes über die Bestandswand



Abbildung 2.6-17: Ansicht der Ausführung des Randstreifens als PU-Dämmung sowie das Kantholz als äußerer GEDT-Abschluss vor der Verklebung der Elemente

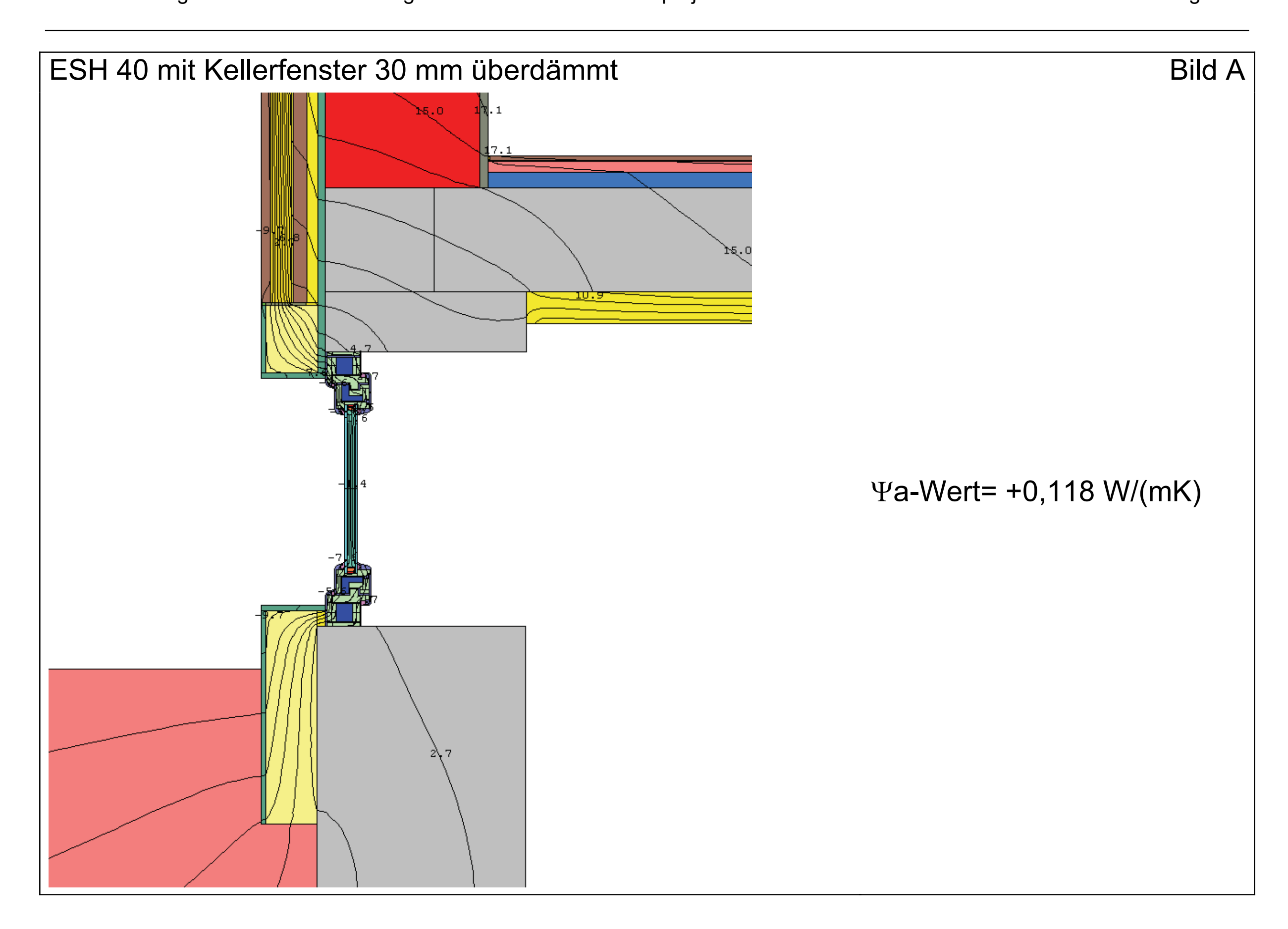
2.6.7.3 GEDT an Perimeterdämmung

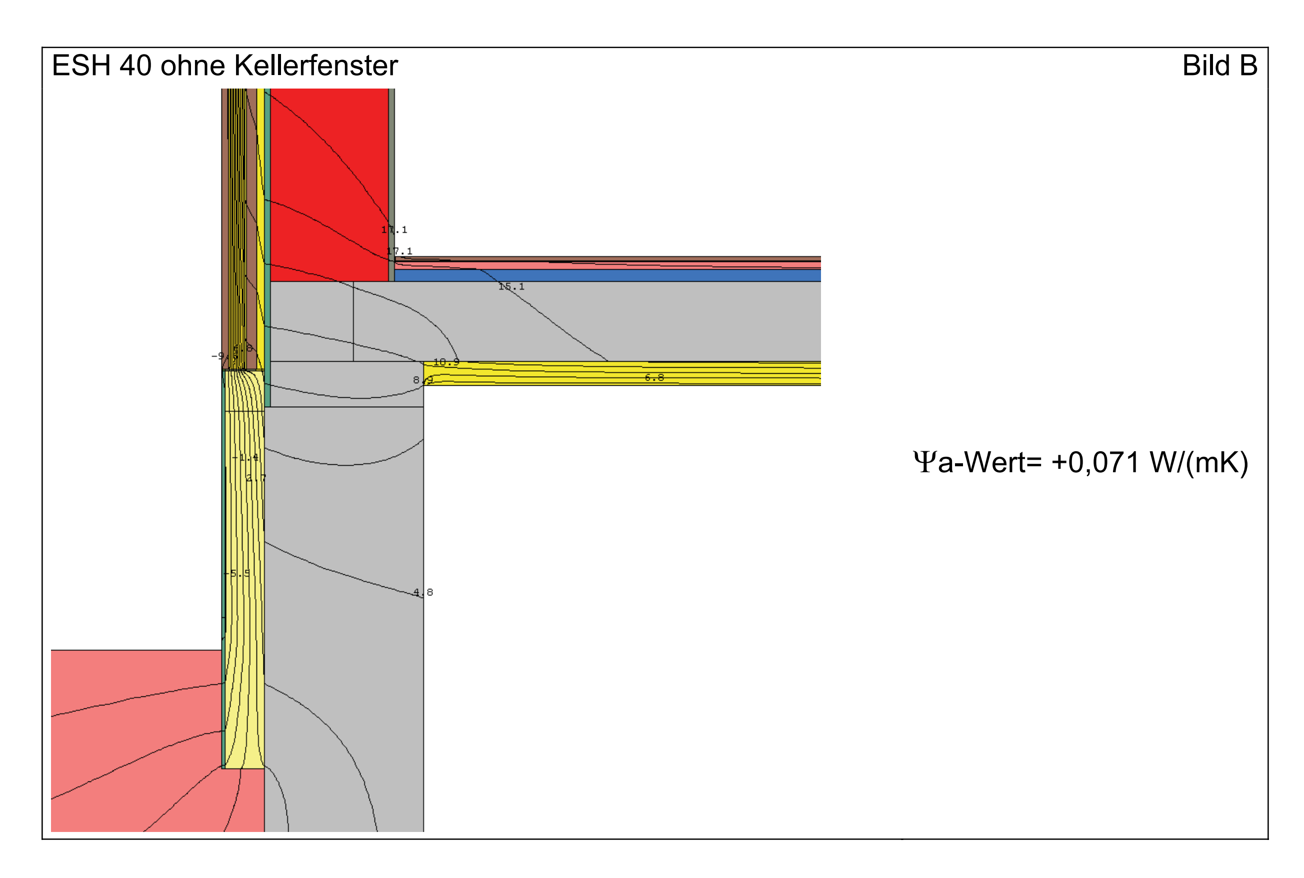
Für das EnEV-Neubau-Haus und den ESH 40-Standard wurde die Situation des Kellerdeckenauflagers mit und ohne Kellerfenster betrachtet. Tabelle 2.6-6 zeigt die einzelnen Varianten, deren tatsächlicher Länge am Gebäude, den außenmaßbezogenen Wärmebrückenverlustkoeffizienten Ψ_a und den sich daraus ergebenden Transmissionswärmeverlust H_T in W/K.

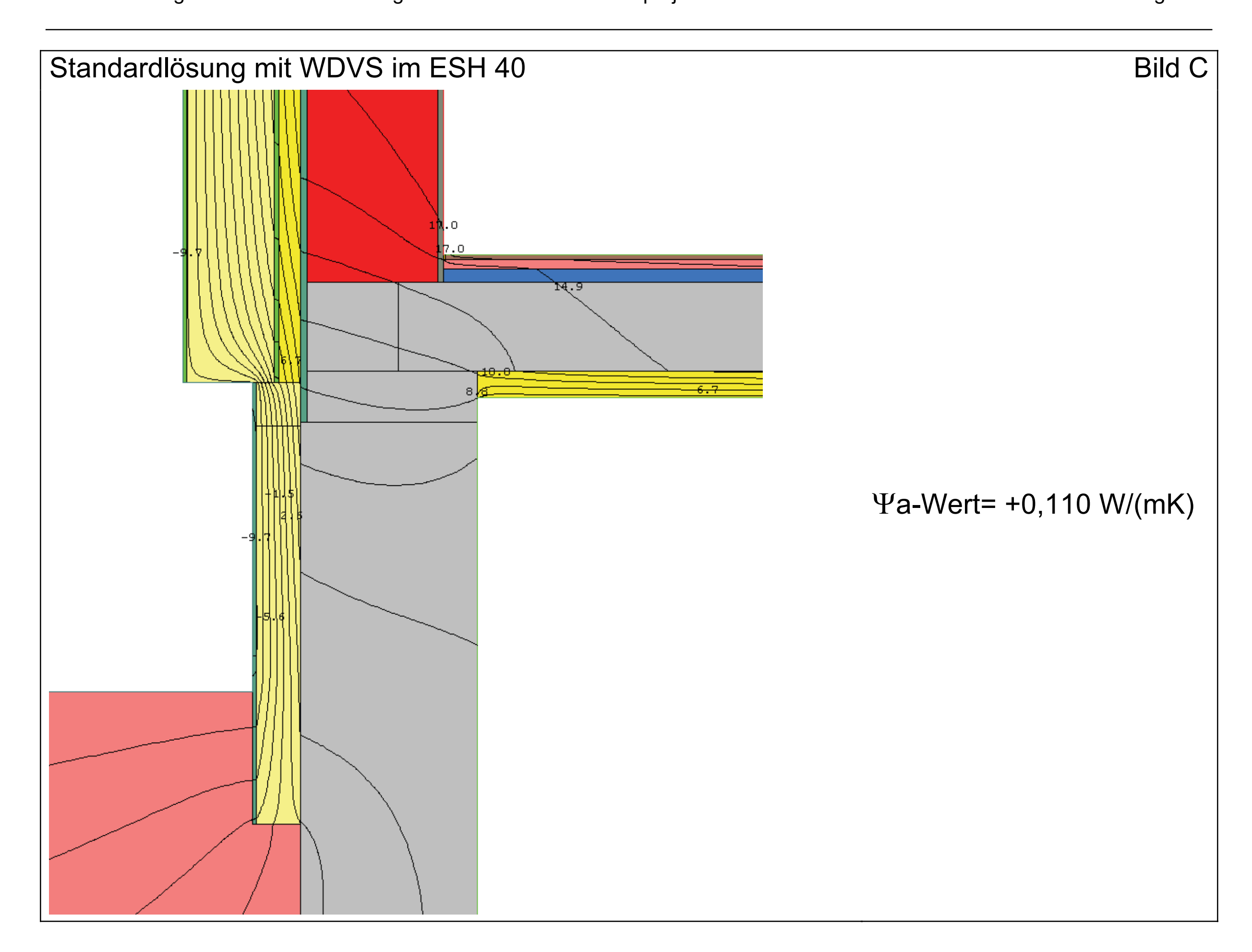
Tabelle 2.6-6: Varianten für die Ausführung der Perimeterdämmung

Variante	Länge am Gebäude	Ψa [W/(mK)]	H_T [W/K]
Perimeter Haus 39 mit Fenster (Bild A) (30 mm überdämmt)	2 * 0,78 m	0,118	0,184
Alternativ: Perimeter Haus 39 mit Fenster (ohne Überdämmung, siehe Anhang)	2 * 0,78 m	0,135	
Perimeter Haus 39 ohne Fenster (Bild B)	8,88 m	0,071	0,631
Perimeter Haus 35/37 mit Fenster (siehe Anhang)	2 * 0,78 m	0,197	0,308
Perimeter Haus 35/37 ohne Fenster (siehe Anhang)	8,88 m	0,137	1,217
Vergleich: Haus 39 mit WDVS mit Fenster (siehe Anhang)	2 * 0,78 m	0,154	0,240
Vergleich: Haus 39 mit WDVS ohne Fenster (Bild C)	8,88 m	0,110	0,977

Der Einbau der Kellerfenster (kalter Keller) beeinflusst ähnlich wie im beheizten Bereich auch den WBV der Einbausituation. Durch eine Überdämmung des Rahmens des Kellerfensters kann der WBV im ESH40 von 0,135 W/(mK) auf 0,118 W/(mK) gesenkt werden (Bild A). Allerdings ist die zugehörige Länge und somit auch der Wärmeverlust wegen der zwei vergleichsweise kleinen Kellerfenster gering. In dem Bereich des Kellerdeckenauflagers, in dem keine Fenster vorhanden sind, liegt der WBV bei 0,071 W/(mK) (Bild B) und beträgt somit weniger als die Hälfte des vergleichbaren Anschlusses ohne GEDT (Bild C).
Im Anhang III sind weitere Abbildungen mit Isothermendarstellungen wiedergegeben.


ESH 40 mit Kellerfenster 30 mm überdämmt
Bild A
Ψa-Wert= +0,118 W/(mK)


ESH 40 ohne Kellerfenster
Bild B
Ψa-Wert= +0,071 W/(mK)



Von den Wärmebrücken im GEDT-Randbereich weist der Anschluss der Elemente an die Perimeterdämmung die ungünstigsten Kennwerte auf. Der Wärmeverlust an dieser Stelle summiert sich auf 0,815 W/K beim ESH 40 und auf 1,52 W/K beim ESH60 bzw. beim EnEV-Neubau-Standard. Dennoch ist festzuhalten, dass die Wärmebrückenwirkung durch die GEDT mit VIP gegenüber einem konventionellen Dämmsystem tendenziell verbessert wird, wie man an der Vergleichsberechnung des Details mit WDVS erkennt, das noch schlechter abschneidet (1,22 W/K als ESH40 Detail gerechnet).
Wichtig ist es, bei den Kellerfenstern eine möglichst große Überdämmung des Fensterrahmens zu erreichen (ca. 30 mm).

2.6.7.4 GEDT an Traufe

Der Anschluss des GEDT-Elements an die Traufe stellt eine Kombination einer geometrischen mit einer konstruktiven Wärmebrücke dar. Hier gilt es den Übergang vom schlanken GEDT auf den vollständig gedämmten Dachüberstand möglichst optimal zu erreichen.
Abbildung 2.6-18 zeigt die Isothermendarstellung des Traufanschlusses. Wie bei allen vorangegangen Berechnungen ist die Fassadenbekleidung, die hier kaum einen Einfluss hat, nicht berücksichtigt, sondern die Konstruktion wurde sowohl im Dachbereich als auch an der GEDT-Außenwand so berechnet, als würde sie direkt an die kalte Außenluft grenzen (unter Berücksichtigung der tatsächlichen Übergangswiderstände).

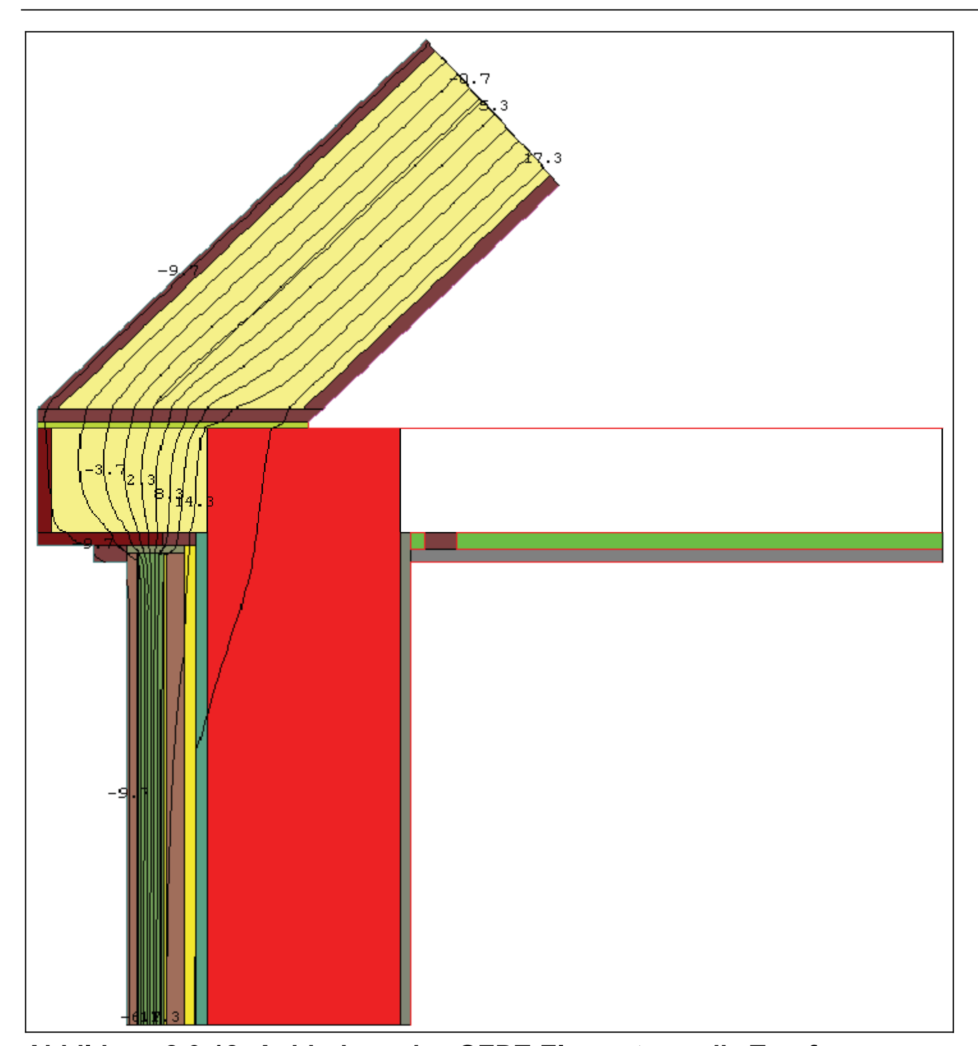


Abbildung 2.6-18: Anbindung des GEDT-Elements an die Traufe.

Für die dargestellte Situation ergibt sich ein WBV von Ψa = 0,019 W/(mK). Optimierungsmöglichkeiten des Details, wie z. B. das Weglassen der unteren Schalung am Dachüberstand könnten den WBV auf fast 0,0 W/(mK) senken, scheitern aber an der praktischen Realisierbarkeit vor Ort.

2.6.7.5 Zusammenfassung der Wärmebrücken am GEDT-Anschluss

Die linearen Wärmebrücken, die bei der Anbindung der GEDT-Elemente an das übrige, konventionell gedämmte Gebäude berücksichtigt werden müssen, sind in Tabelle 2.6-7 zusammengestellt.

Tabelle 2.6-7: Zusammenfassung der linearen Wärmebrücken an den GEDT-Anschlüssen

Anschluss	Ψ_a-Wert [W/(mK)]	Länge [m]	H_T [W/K]
Fenster an GEDT	0,004	19,872	0,079
WDVS an GEDT	-0,021	11,82	-0,248
Perimeter ohne Kellerfenster an GEDT	0,071	8,88	0,630
Perimeter mit Kellerfenster an GEDT	0,118	1,56	0,184
Traufe an GEDT	0,019	10,44	0,199
Summe			0,844

Der Beitrag dieser Wärmebrücken zum Transmissionswärmeverlust H_T des Gebäudes beträgt insgesamt 0,844 W/K. Zum Vergleich: Die GEDT-Fassade (inklusive Fenster) trägt insgesamt mit U_{GEDT}x A_{GEDT} + $U_{Fenster}$ x $A_{Fenster}$ = 0,188 W/m²K x 55,9 m² + 0,8 W/m²K x 5,8 m² = 15,1 W/K zum Transmissionswärmeverlust bei.

3 Fertigung und Montage

Die Fertigung und Montage der Großelemente mit Vakuumdämmung wurde von der Firma Variotec durchgeführt. Alle Projektpartner waren in diesen Prozess mit eingebunden, sowohl bei der Prototypfertigung und Qualitätskontrolle, als auch bei der späteren Durchführung. Für verschiedene Arbeitsschritte wurden durch Variotec Unterauftragnehmer eingesetzt, insbesondere die Firma O.Lux, Georgensgmünd, (Holzbau, Montage), die Firma Petry, Neumarkt (Metallbau) und die Firma Simon, Hochheim (Fassadenbau).

3.1 Fertigung der GEDT-Elemente

3.1.1 Prototypfertigung

Angesichts der erheblichen Herausforderung an die Genauigkeit von Planung und Ausführung, die mit der Entwicklung von neuartigen Großelementen zur Fassadenmodernisierung verbunden war, wurde beschlossen, zunächst Prototypen zur fertigen, um wesentliche Eigenschaften der Elemente vor der endgültigen Fertigung testen zu können.

Die erste Prototypserie (Juni 2005) wurde in deutlich verkleinerter Ausführung gefertigt und diente vor allem dazu, die wichtigsten Metallpunkte, insbesondere auch den Mechanismus der Aufhängung zu untersuchen (Abbildung 3.1-1).



Abbildung 3.1-1: GEDT-Prototyp I

In der zweiten Prototypserie (September 2005) wurde ein Element in Originalgröße (aber ebenfalls noch ohne Originalmaterialien gefertigt) (Abbildung 3.1-2). Außerdem wurden verkleinerte Elemente zur Darstellung besonderer Situationen hergestellt (Abbildung 3.1-3).



Abbildung 3.1-2: Prototyp II: Montage unter einer Attrappe für den Dachüberstand



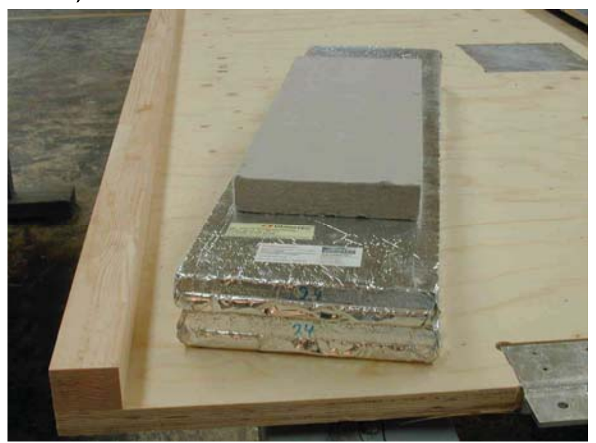
Abbildung 3.1-3: Prototyp II: Darstellung von Detailsituationen

Die Fertigung von Prototypen war für den Erfolg des Projekts von erheblicher Bedeutung. Die komplizierte geometrische Situation konnte letztlich nur durch die Anschauung am konkreten Objekt umfassend beurteilt werden. Dies gilt sowohl im Hinblick auf das Aufhängungssystem als auch für die Koordination der Einbauten in den verschiedenen Ebenen des Elements und an den Rändern. Aufgrund der Erfahrungen mit den Prototypen wurden verschiedene Modifikationen bzw. Nachbesserungen an den Großelementen durchgeführt.

3.1.2 Endfertigung

Im Folgenden ist die Produktion der Großdämmelemente etappenweise dargestellt.

Die Firma Variotec produziert unter anderem auch Vakuum-Isolationspaneele (Qasa) und konnte daher die im Projekt eingesetzte Vakuumdämmung selbst herstellen (Abbildung 3.1-4).



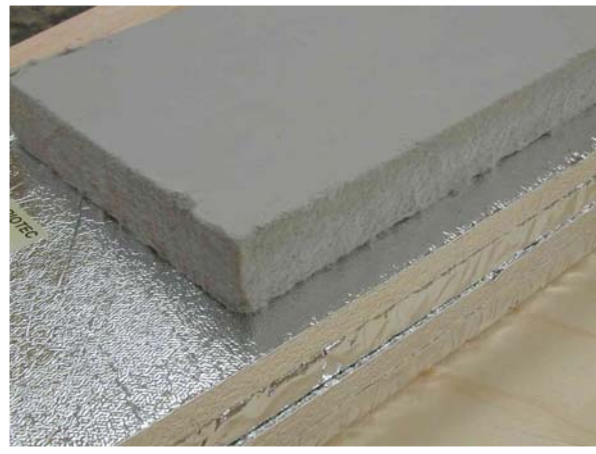


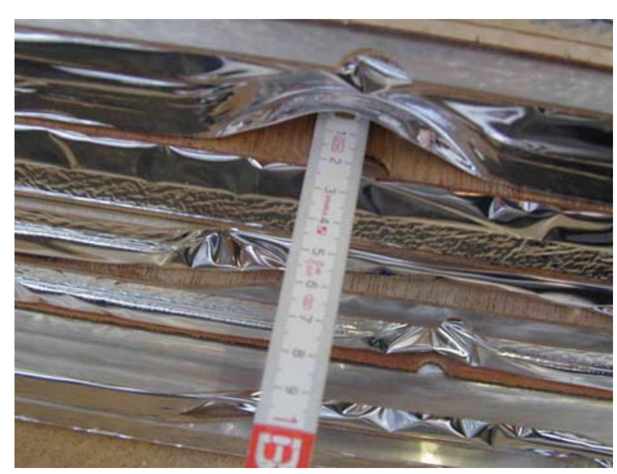
Abbildung 3.1-4: Zwei kleine Vakuum-Isolationspaneele (übereinander liegend), darauf das Kernmaterial (pyrogene Kieselsäure)

Zum Schutz der Elemente während des Produktionsprozesses wurden auf beiden Seiten dünne Schutzschichten aufgebracht. Der Rand der Paneele wurde durch ein vorkomprimiertes Dichtband („Kompriband“) geschützt (Abbildung 3.1-5).



Abbildung 3.1-5: Aufkleben des Kompribandes vor dem Verkleben der „eingehausten“ VIPs

Bereits bei der Produktion der Paneele wurden Aussparungen an den Stellen, an denen Metallanker die Vakuumdämmung durchstoßen, eingearbeitet (Abbildung 3.1-6).



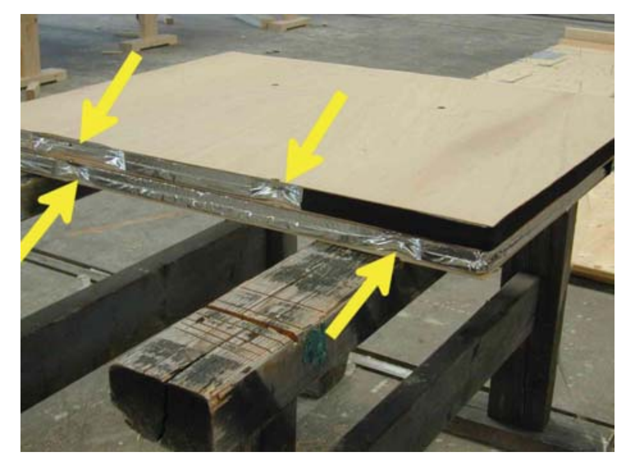


Abbildung 3.1-6: Aussparungen an den VIP-Rändern für die spätere Durchführung von Befestigungsankern

Die Behandlung der hinteren Tragplatte (Kerto) erfolgte mit einer CNC-Fräse (Abbildung 3.1-7).



Abbildung 3.1-7: Bearbeitung der Kerto-Platte mit CNC-Fräsmaschinen

Die folgenden Abbildungen zeigen Ausfräsungen in der BFU- und Kerto-Platte zur Aufnahme von Metallteilen (Abbildung 3.1-8).

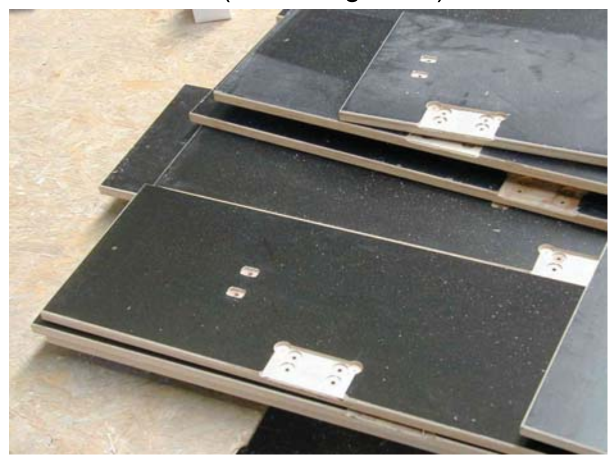




Abbildung 3.1-8: Ausfräsungen für Metallbeschläge an BFU- (links) und Kerto-Platten (rechts)

Auf dem folgenden Foto (Abbildung 3.1-9) wird eine Kerto-Platte zum Einbau der Metallteile platziert. Man erkennt die Ausfräsungen für verschiedene Metallpunkte und für das Fenster. Die später auch in Hofheim eingesetzte Montage-Traverse wurde bereits im Werk verwendet, um die großen Platten und Elemente zu bewegen.



Abbildung 3.1-9: Transport der Kerto-Platte

Der Einbau der Stahlteile (Abbildung 3.1-10) erforderte eine sorgfältige Koordination mit der Metallbaufirma.

In Abstimmung mit dem Fertigungsprozess wurden zuerst die für die Produktion der Elemente, anschließend die für den Einbau an der Fassade in Hofheim benötigten Teile hergestellt.



Abbildung 3.1-10: Einbau der Metallbeschläge in die Kerto-Platte

Die Abbildungen zeigen eine Auswahl, detaillierte Bilder der einzelnen Punkte finden sich in u. a. in Kap. 2.2.
Ein relativ komplexes Element ist der E-Punkt (Abbildung 3.1-11), der zur Aufhängung dient und eine Justage in allen drei Raumrichtungen ermöglicht. Ein Teilstück wurde in Hofheim an der Fassade montiert, während der Einbau des anderen Teilstücks in die Kerto-Platte hier zu sehen ist.



Abbildung 3.1-11: Montage des E-Punktes in die Kerto-Platte

Von besonderer Bedeutung für die Wärmebrückeneffekte waren die durch die Dämmebene durchstoßenden Punkte. Abbildung 3.1-12 sind die in das Kerto eingelassenen PG- und PW-Punkte zu sehen.

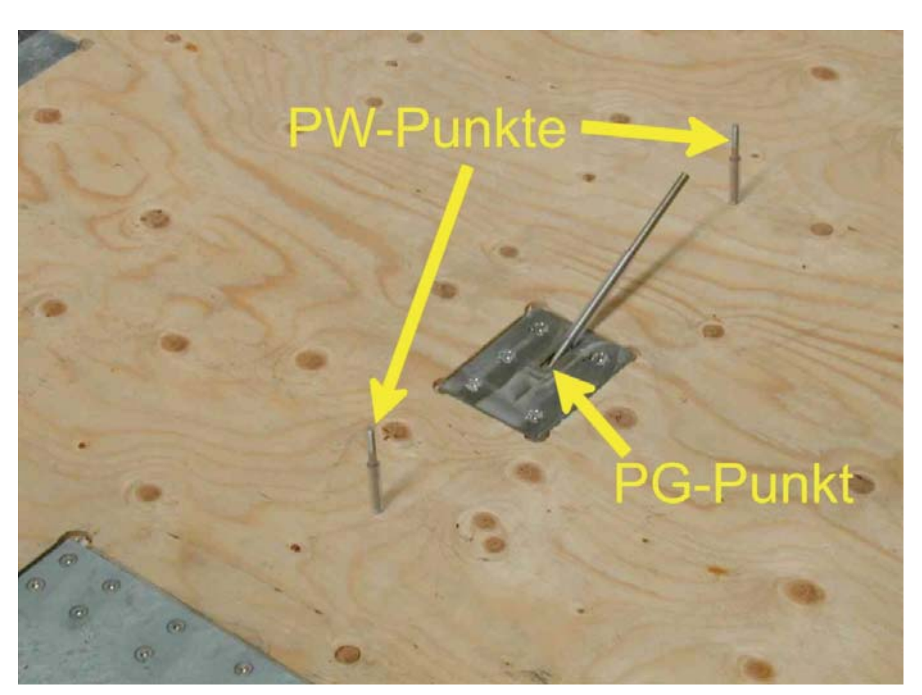


Abbildung 3.1-12: Lage der PW- und PG-Punkte in der Kerto-Platte

Nach Einbau aller Metallpunkte erfolgte der schrittweise Einbau der weiteren Schichten des Elements. Aufgrund der angewendeten Verklebungstechnik musste gleichzeitig schnell und

genau gearbeitet werden. Zunächst wurden die Vakuum–Isolationspaneele aufgebracht (Abbildung 3.1-13).



Abbildung 3.1-13: Aufkleben der VIPs auf die Kerto-Platte

Im Vordergrund des folgenden Bildes wird der Klebstoff aufgebracht (Abbildung 3.1-14).



Abbildung 3.1-14: Auftragen des PU-Klebers auf die Kerto-Platte

Der äußere Rand der Elemente schließt mit einer schmalen PU-Dämmplatte und einem Kantholz ab (Abbildung 3.1-15). An dieser Stelle wird das Großelement später die Gebäudefassade überragen, von hinten schließt sich dann das konventionelle Wärmedämmverbundsystem an, das auf den anderen Außenwänden der Häuser in Hofheim verwendet wurde.

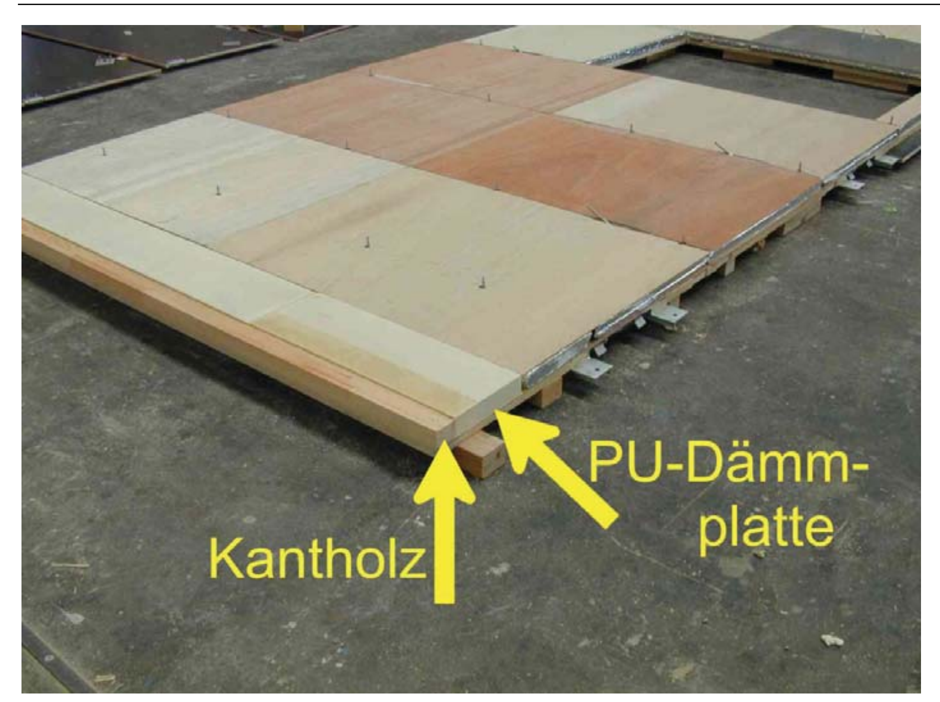


Abbildung 3.1-15: Lage von Kantholz am GEDT-Rand und PU-Dämmplatte

Nach der Vakuumdämmung wurde die vordere BFU-Deckplatte segmentweise aufgebracht (Abbildung 3.1-16).



Abbildung 3.1-16: Verkleben der BFU-Platten auf die VIPs

Die ausgesparten Fugen an den durchstoßenden Metallankern wurden zum Verschließen der Hohlräume, insbesondere auch zur Reduzierung der Wärmebrückenwirkung, mit PU-Ortschaum gefüllt (Abbildung 3.1-17).



Abbildung 3.1-17: Ausschäumen von Fugen und Hohlräumen mit PU-Ortschaum

Anschließend wurden die Metallanker an der BFU-Deckplatte festgeschraubt (Abbildung 3.1-18).



Abbildung 3.1-18: Montage der äußeren Teile der Befestigungsanker

Während des Aushärtens der Verklebungen wurden die Elemente mit Gewichten beschwert (Abbildung 3.1-19).



Abbildung 3.1-19: GEDT mit Gewichten während des Aushärtens des Klebers

Der Rand der Elemente wurde mit Butylvlies-Dichtbändern abgeklebt (Abbildung 3.1-20). Danach wurden die Stahl-Randpunkte montiert, die die Dämmebene in der GEDT-GEDT-Fuge durchstoßen. (Die auf dem rechten Bild ebenfalls sichtbare waagerechte Abklebung schützt eine Messleitung, s. Kapitel 4).



Abbildung 3.1-20: Kantenschutz der GEDT-Elemente

Auch die Fenster wurden bereits im Werk in die Elemente eingebaut. Auf dem rechten Bild ist zu sehen, dass zuvor noch die BFU-BFU-Stöße ebenfalls mit Butylband abgeklebt worden waren (Abbildung 3.1-21).



Abbildung 3.1-21: Montage des Fensters in ein GEDT

Im Folgenden sind einige Anschlussdetails der Fenster dargestellt (Abbildung 3.1-22). Es mussten Verbindungen zwischen Fensterrahmen, Kerto-Tragplatte und – beim Einbau in den Gebäuden – zur Fensterleibung vorgesehen werden. Die Anschlüsse wurden so konstruiert, dass ein späterer Ersatz der Fenster ohne Schäden für das GEDT-Element grundsätzlich denkbar ist.



Abbildung 3.1-22: Einbau des Fenster in ein GEDT – Details Abdichtung

Auch der Fensterflügel wurde im Werk montiert. Der gesamte Produktions- und Montageprozess wurde durch die Firma Wallig Film und TV Produktion, Frankfurt, dokumentiert (Abbildung 3.1-23, rechtes Bild, Vordergrund). Der Film kann auf der Internet-Homepage des IWU www.iwu.de heruntergeladen werden.



Abbildung 3.1-23: Montage des Fensters

Auf der BFU-Deckplatte wurde die Aluminium-Unterkonstruktion festgeschraubt (Abbildung 3.1-24). Die dafür erforderlichen Gewindestangen waren bereits vorher in das BFU eingelassen worden. Ein Teil der Alu-Profile überlappte vom oberen zum unteren Element und wurde daher erst auf der Baustelle in Hofheim eingebaut.
Die auf der BFU sichtbaren Metallpunkte wurden mit einer dünnen Schaumstoffschicht überdämmt, um die Wärmebrückenwirkung zu reduzieren. Auf dem ersten Foto ist dies zunächst nur auf der rechten Seite des Elements ausgeführt.

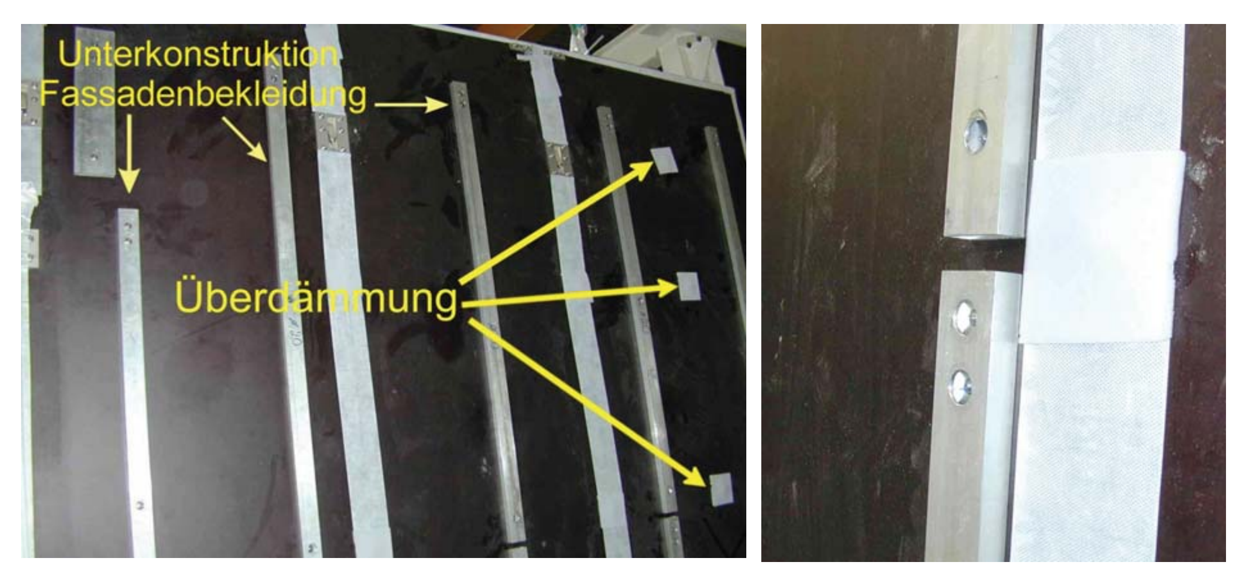


Abbildung 3.1-24: Montage der Aluminiumprofile der Unterkonstruktion

Die folgende Foto zeigt zwei fast fertige Elemente. Auf der Kerto-Seite des vorderen Elements sind die durch Abklebungen geschützten Messleitungen zu sehen, mit denen im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitforschung die Funktionsfähigkeit der Vakuumdämmelemente vermessen wird (s. Kapitel 4). Die Messleitungen wurden in der Kabelrolle am linken Rand zusammengeführt (Abbildung 3.1-25). Die Ausgleichsdämmung (Mineralwolle) wurde hier noch nicht aufgebracht.



Abbildung 3.1-25: Ansicht eines fertigen GEDT-Elements (Wandseite) und der Messtechnik

Neben den Großelementen wurden - für den Einbau zwischen der Oberkante des oberen Großelements und dem Dachüberstand der Gebäude – auch noch kleinere Füllelemente produziert (Abbildung 3.1-26). Als Wärmedämmschicht wurde auch hier jeweils ein Vakuum-Isolationspaneel eingebaut.



Abbildung 3.1-26: Ansicht der Füll-GEDT

3.2 Montage der Großelemente

Parallel zur Endphase der Elementfertigung wurden in Hofheim die Stahlteile an den Gebäudefassaden montiert. Dabei musste zunächst die genaue Lage der Punkte durch ein Vermessungsteam bestimmt und eingezeichnet werden. Das alte 4 cm dicke Wärmedämmverbundsystem aus den 80er Jahren war zu diesem Zeitpunkt schon entfernt worden. Da dies bereits im Jahr zuvor geschehen war, war das Gebäude mit Energiesparhaus-40-Standard und kontrollierter Lüftungsanlage mit einem neuen luftdichten Putz versehen worden (Abbildung 3.2-1, rechtes Foto). Bei den anderen Gebäuden wurde der Altputz ausgebessert, indem Dübellöcher des alten Wärmedämmverbundsystems geschlossen wurden.





Abbildung 3.2-1: Ansicht der Gebäude vor Montage der Befestigungspunkte; links EnEV-Neubau, rechts ESH40; die Markierungen zeigen die spätere Lage der Befestigungspunkte

Der Einbau der Metallteile wurde vorbereitet, indem der Altputz entfernt wurde, so dass die Ziegel der äußeren Wandschale freigelegt wurden (Abbildung 3.2-2).

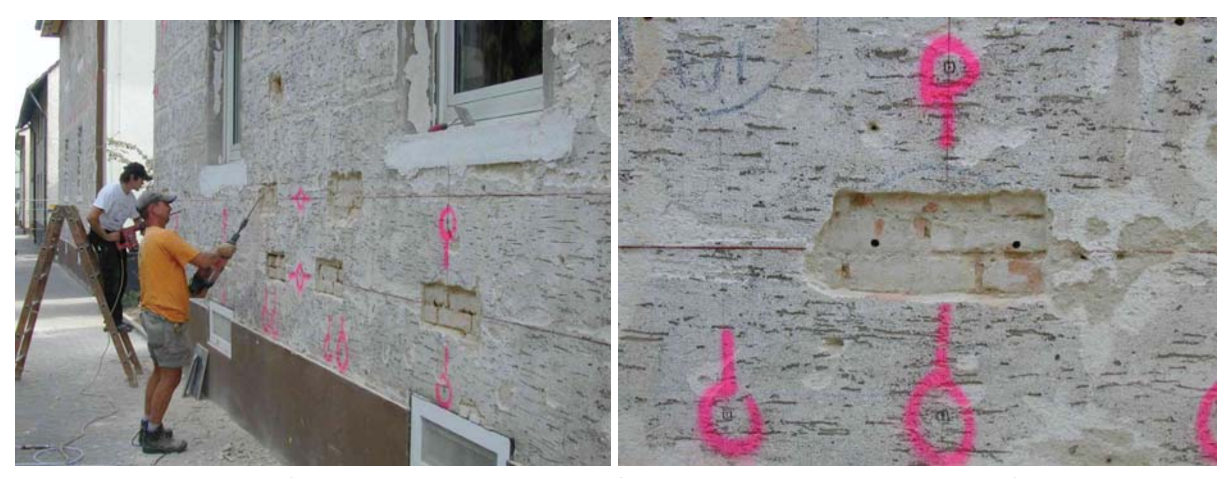


Abbildung 3.2-2: Entfernen des Altputzes an Stellen, an denen die Wandbefestiger montiert werden

Zur Befestigung der Gewindestangen für die Aufnahme der Metallpunkte (linkes Foto, rechts) wurden spezielle Dübel (Abbildung 3.2-3) verwendet, die vorher vor Ort in Auszugsversuchen getestet worden waren (s. Kapitel 2.3.3).



Abbildung 3.2-3: Abmessen der Spezialdübel für die Wandbefestiger

Dübel und Gewindestangen wurden in die Wand einbetoniert (Abbildung 3.2-4).

Vor Installation der Stahlteile wurde zur Verbesserung der Luftdichtheit eine Folie eingeklebt (Abbildung 3.2-5).

Der Einbau der Stahlpunkte erfolgte durch Verschraubung mit den Gewindestangen. Die Abbildung 3.2-6 zeigt einen eingebauten W-Punkt (links) und einen E-Punkt (rechts).

Auf Abbildung 3.2-7 ist sind die Gesamtfassaden mit W- und E-Punkten zu sehen



Abbildung 3.2-4: Montage der Spezialdübel



Abbildung 3.2-5: Abdichten des Wandbefestiger (W-Punkt) zur Verbesserung der Luftdichtheit



Abbildung 3.2-6: Ansicht montierter Befestigungspunkte: links W-Punkt, rechts E-Punkt



Abbildung 3.2-7: Ansicht der Fassade mit montierten Wandbefestigern; links EnEV-Neubau, rechts ESH40

Nach Abschluss dieser Vorarbeiten wurden die vorgefertigten Großelemente mit einen Glas-Innenlader angeliefert (Abbildung 3.2-8).



Abbildung 3.2-8: Ansicht des Transportgestells der GEDT mit sechs Elementen

Zur Elementmontage wurden ein Teleskopstapler und die speziell für das Projekt entwickelte Montage-Traverse eingesetzt (Abbildung 3.2-9).



Abbildung 3.2-9: Anheben und Transport eines GEDT-Elements mit dem Teleskopstapler

Es wurde jeweils zuerst auf einer Gebäudeseite das untere Element eingesetzt (Abbildung 3.2-10). Das Einrichten der in alle drei Raumrichtungen verstellbaren E-Punkte erforderte immer eine besondere Aufmerksamkeit. Anschließend wurde das darüber liegende Element eingehängt.



Abbildung 3.2-10: Montage des ersten und zweiten GEDT-Elements



Abbildung 3.2-11: Ausrichten des oberen Elementes

Dabei wurde zunächst ein Probedurchgang durchgeführt, um zu gewährleisten, dass die korrekte Position der Elemente eingehalten werden konnte. Die Elemente wurden dann noch einmal abgenommen, in die W-Punkte wurde Vergussmörtel eingegossen (Aushärtezeit ca.

1 Stunde), und die Elemente wurden schließlich endgültig montiert. Die folgende Abbildung 3.2-12 zeigt einen mit (Test-)Mörtel gefüllten W-Punkt an der Fassade sowie einen W-Punkt auf der Rückseite eines Großelements, der bei der Montage in den Fassadenpunkt eingreift sowie die Montage des letzten Elements (inklusive Verfüllen des Mörtels)



Abbildung 3.2-12: W-Punkt (Wandseite) mit Testfüllung aus Vergussmörtel (links oben) und GEDT-seitigem Gegenstück (rechts oben) sowie Füllen des W-Punkts (links unten) und Montage des letzten GEDT-Elements

Die Abbildung 3.2-13 zeigt eine komplette Fassade nach Montage aller Elemente, bevor die Unterkonstruktion für die Fassadenbekleidung montiert wurde.



Abbildung 3.2-13: Straßenfassade nach Montage der GEDT-Elemente, vor der Befestigung der Unterkonstruktion für die Fassadenbekleidung

Auf den folgenden Fotos der Abbildung 3.2-14 sind einige Anschlussdetails zu sehen. An den Elementrändern wurden die M-Punkte (unten) und K-Punkte (seitlich) eingebaut. An der Stelle, wo später der K-Punkt montiert wird, ist hier nur die Aussparung zwischen dem GEDT-Element und dem Wärmedämmverbundsystem der Nachbarfassade abgebildet. An der Rückseite des Elements sind in der Aussparung zwei bereits werkseitig eingebaute Gewindestangen zur Aufnahme des K-Punkts zu erkennen.





Abbildung 3.2-14: Detailansicht von M-Punkt (links) und K-Punkt (rechts)

Die Fugen zwischen den Großelementen wurden mit vorkomprimiertem Dichtband ausgefüllt, das jeweils vor dem Einhängen des zweiten Elements auf dem ersten aufgebracht wurde. Anschließend wurden die Fugen außen mit Butylkautschuk-Klebeband verschlossen.



Abbildung 3.2-15: Detail einer GE-GE-Fuge (links, Blick auf Kompriband) und abgedichtete Elementfuge (rechts)

Auch die Füllelemente wurden jetzt eingebaut, um die für den Montageablauf notwendige Lücke zwischen den oberen GEDT-Elementen und dem Dachüberstand zu schließen (Abbildung 3.2-16).



Abbildung 3.2-16: Ansicht des Füll-GEDT am Dachüberstand

Im Anschluss wurde die Außenbekleidung angebracht. Es wurden Harzkompositplatten der Firma Resopal eingesetzt (Abbildung 3.2-17 links). Die Aluminium-Unterkonstruktion war auf den unteren Elementen bereits werkseitig montiert worden, die oberen Teile, die die beiden Großelemente sowie die Füll-Elemente überlappten, wurden vor Ort in Hofheim installiert. Zur Abdeckung der horizontalen Fugen wurden Aluminiumprofile angebracht (Abbildung 3.2-17 rechts)

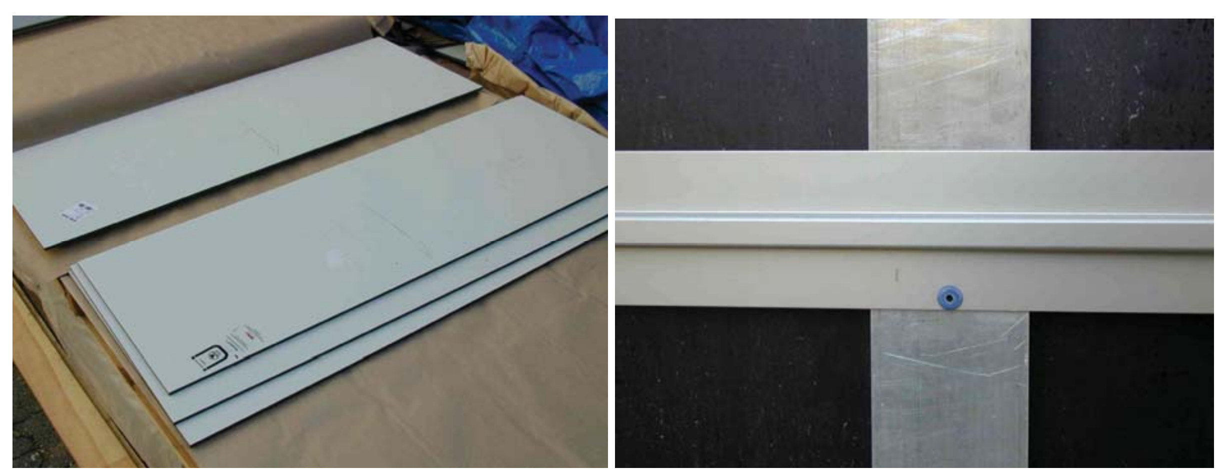


Abbildung 3.2-17: Ansicht Harzkomposit-Platten (links) und Fugenprofil der Unterkonstruktion (rechts)

Die Fassadenplatten wurden auf der Aluminiumkonstruktion aufgeklebt. Dazu war eine Vorbehandlung mit einem „Primer“ notwendig (Abbildung 3.2-18 links). Um die Elemente während der Aushärtung des Klebers zu fixieren, wurde doppelseitiges Klebeband eingesetzt (Abbildung 3.2-18 rechts).



Abbildung 3.2-18: Primern der Harzkomposit-Platten an den Klebestellen (links) und doppelseitiges Klebeband (rechts) zur Fixierung der Platten

Der eigentliche, dauerhafte Kleber wurde parallel zum Klebeband auf den vertikalen Aluminiumprofilen aufgebracht. Die folgende Abbildung 3.2-19 gibt einige Eindrücke vom Fortschritt der Arbeiten wieder.

Abbildung 3.2-19: Montageablauf der Harzkomposit-Platten

Parallel zu den Arbeiten an der Außenfassade wurden in den Wohnungen die alten Fenster demontiert (Abbildung 3.2-20).



Abbildung 3.2-20: Demontage der alten Fenster

Die neuen Fenster, die bereits in den Großelementen integriert waren, wurden in der Fensterleibung angeschlossen (Abbildung 3.2-21 links) und die Folienlappen zur Luftdichtung aufgeklebt (Abbildung 3.2-21).



Abbildung 3.2-21: Befestigung der Fenster in der Leibung (links) und Abdichten mit einem Folienlappen (rechts)

Abschließend wurden die Leibungen mit Gipskartonplatten verkleidet, tapeziert und überstrichen (Abbildung 3.2-22, links) und die Verdunklung in den Fensterflügel eingesetzt (Abbildung 3.2-22, rechts).



Abbildung 3.2-22: Fensterleibung mit Verkleidung aus Gipskarton (links) und fertiges Fenster mit Verdunklung (rechts)

Außen wurden noch die Randanschlüsse durchgeführt. Eine Luftdichtungsfolie wurde zwischen den Elementrändern und der Außenwand bzw. dem Sockel hergestellt (Abbildung 3.2-23). Der Seitenrand der Großelemente wurde durch ein Aluprofil überdeckt.

Abbildung 3.2-23: Abdichtung der GEDT-Elemente an das WDVS (oben links) und an den Perimeter (oben rechts) sowie Schließen der Arbeitsfuge zum WDVS (unten links) und Anschluss der Perimeterdämmung (unten rechts)

Am Ende wurden die Anschlüsse an das Wärmedämmverbundsystem der Nachbarfassaden und an die Perimeterdämmung hergestellt.
Die folgende Abbildung 3.2-24 zeigt die fertigen Fassaden in Hofheim



Abbildung 3.2-24: Ansicht der fertigen Straßenfassaden mit GEDT-Elementen

3.3 Qualitätskontrolle und Korrekturen

Während der gesamten Produktion fanden Zwischenabnahmen mit den Projektbeteiligten statt. Diese Abnahmen waren ursprünglich für folgende Fertigungsstadien vorgesehen:

- Stahlteile-Nullserie:
  Eine Serie der Stahlteile für ein Element wurde gefertigt. An dieser Nullserie wurden die Planungs- und Ausführungsqualität überprüft.
- Zwei transportfertige Musterelemente:
  Zwei GEDT (komplett gefertigt, ohne Wetterschutzschale) wurden an einer an der Produktionsstätte errichteten Testwand montiert. Dabei wurden die Planungs- und Ausführungsqualität sowie der Ablauf der Montage überprüft.
- Alle transportfertigen GEDT:
  Alle GEDT wurden vor dem Transport nach Hofheim auf Ausführungsqualität und einwandfreien Zustand überprüft.
- Fertig gestellte Fassade:
  Endabnahme der fertigen Fassade in Hofheim



Abbildung 3.3-1: Erster Abnahmetermin der Metallteil-Nullserie

Es stellte sich heraus, dass insbesondere in der Anfangsphase der Produktion Modifikationen bzw. Nachbesserungen und somit auch weitere Termine zur Qualitätskontrolle notwendig wurden. Teilweise waren Planungsvorgaben in der Produktion nicht genau eingehalten worden, teilweise machte der reale Produktionsablauf Modifikationen notwendig, die in der Planungsphase nicht im Einzelnen vorhergesehen werden konnten. Auch während der Produktionsphase war also eine intensive Zusammenarbeit aller Projektpartner notwendig, da einzelne Änderungen am Gesamtkonzept Auswirkungen in allen Bereichen (bis hin zur Berechnung der Wärmebrücken) haben konnten.

Die Herstellung der Metallteile erwies sich insgesamt als schwierig. Es handelt sich um geometrisch komplizierte Elemente, deren erstmalige Realisierung in Sonderanfertigung für das vorliegende Projekt eine besondere Herausforderung darstellte. Hier waren verschiedene Nachbesserungen notwendig, und es entstanden teilweise merkliche

Verzögerungen im Zeitplan. Im Einzelnen waren z. B. einige Schweißnähte anfangs nicht vollständig korrekt ausgeführt und an einigen Stellen vorgegebene Abmessungen nicht genau eingehalten worden. Probleme gab es auch bei einem Teil der Gewindestangen und Muttern: Hier wurde die notwendige Gängigkeit in einigen Fällen nicht erreicht, d. h. es wurde festgestellt, dass einzelne Muttern sich festgefressen hatten.
Die ersten Erfahrungen mit der Produktion der Gesamtelemente führten dazu, die Vakuum-Isolationspaneele beidseitig mit Schutzschichten zu versehen und sie so während der Produktion begehbar zu machen. Zunächst war nur eine einseitige Schutzschicht vorgesehen gewesen und zwar auf der der Kerto-Tragplatte zugewandten Seite, wo aufgrund der vielen und groben Metallteile die Gefahr einer Beschädigung der VIPs in der Tendenz als deutlich größer als auf der BFU-Seite angesehen worden war.
Teilweise waren Abwägungen zwischen unterschiedlichen Projektzielen, z. B. Vereinfachung der Produktion einerseits und Minimierung der Wärmebrücken andererseits, notwendig. So wurde vereinbart, die zunächst leicht unterschiedlichen PWR- und PHW-Punkte zur Vereinfachung der Herstellung identisch zu fertigen (Abbildung 3.3-2). Dies bedeutete, dass die PWR-Punkte ein genau so starkes, die Dämmebene durchstoßendes Metallband wie die PHW-Punkte erhielten, bei denen dies aus statischen Gründen vorgegeben war. Die Wärmebrückenwirkung wurde so leicht vergrößert, der U-Wert des Gesamtelements erhöhte sich dadurch um ca. 0,003 W/m²K, was hier im Pilotprojekt noch toleriert werden konnte.

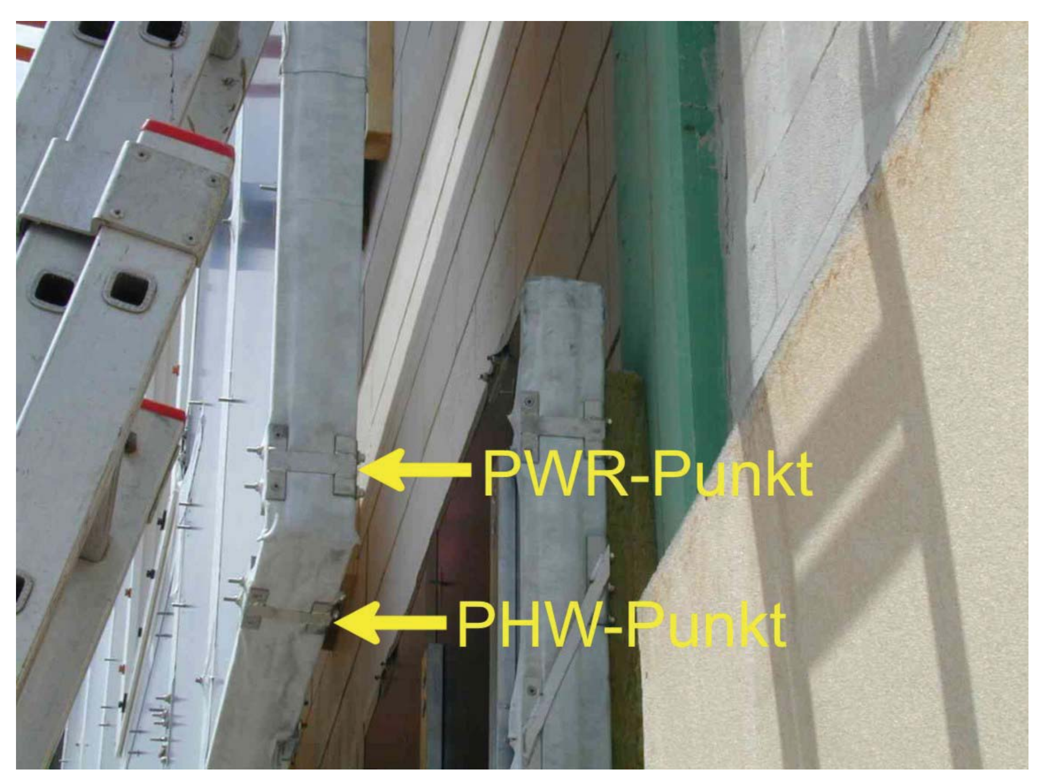


Abbildung 3.3-2: Baugleiche PHW- und PWR-Punkte (an der Horizontal- bzw. Vertikalfuge des oberen Elements, nahe der unteren Ecke)

Auch bei der Abnahme der „transportfähigen Musterelemente“ konnten noch nicht alle Anforderungen erfüllt werden. Bei einem der Elemente konnten die aufgetretenen Probleme durch Nachbesserungen gelöst werden, das zweite allerdings musste teilweise verschrottet werden, da bei mehreren wichtigen Teilen (insbesondere PG-Punkte) nicht mehr nachgebessert werden konnte („festgefressene“ Muttern, dadurch teilweise abgerissene

Gewindestangen, nicht korrekt ausgeführte Verschweißungen). Der Kern der Vakuum-Dämmelemente (Stützmaterial aus pyrogener Kieselsäure) wurde wieder verwendet (und neu evakuiert). Von den Metallteilen konnten die E- und W-Punkte nach Befreiung von Klebresten wieder eingesetzt werden. Die restlichen Teile waren für eine Wiederverwendung zu stark verschmutzt oder verbogen.

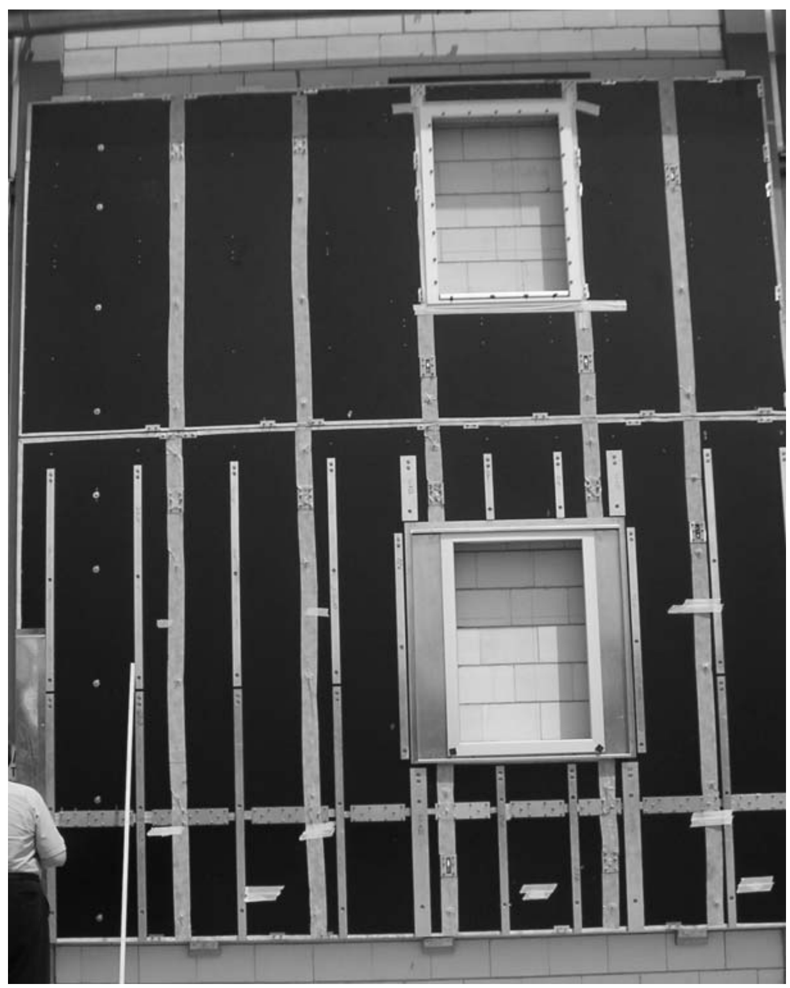


Abbildung 3.3-3: Abnahme der beiden transportfähigen Musterelemente (unten mit, oben ohne Schienen der Unterkonstruktion)

In der Produktion erwiesen sich verschiedene Arbeitsschritte als zeitaufwändig. Dies traf insbesondere auf den Einbau der Metallteile mit der großen Anzahl von notwendigen Verschraubungen zu. Als Beispiel ist hier die notwendige Verlängerung der Kerto-Platten auf den unteren Elementen zu nennen, die eine größere Höhe aufweisen als die oberen. In der oberen Abbildung der Musterelemente ist eine solche Verlängerung auch auf der Frontseite, also beim BFU, zu erkennen. Zu einem späteren Zeitpunkt konnten hier aber Platten mit ausreichenden Längenabmessungen bezogen werden, so dass dieser Arbeitsschritt nur einmal beim Musterelement durchgeführt wurde und anschließend in der Produktion entfiel. Die folgende Abbildung 3.3-4 zeigt die bei den unteren Elementen weiterhin notwendige Verlängerung der Kerto-Schichtholzplatten.



Abbildung 3.3-4: Verlängerung der unteren Elemente (Kerto-Schicht)

Neben verschiedenen leichter behebbaren Mängeln trat während der Produktion noch ein Fehler auf, der größere Korrekturen erforderlich machte: Die Ausschnitte der Kerto-Platte zur Aufnahme der mittleren der jeweils drei U-Punkte (Abbildung 3.3-5) der oberen Elemente waren bei vier von sechs Elementen durch einen Fehler beim automatischen Fräsen um ca. 5 cm seitlich versetzt angebracht worden. Die mittleren U-Punkte mussten daher entfernt werden. Ihre statische Aufgabe wurde durch je zwei zusätzliche, vor Ort in Hofheim in die horizontalen GE-GE-Fugen eingebrachte Verbundanker übernommen.



Abbildung 3.3-5: Rand von zwei Elementen bei der Montage: Der Dorn des U-Punkts (vgl. Abbildung 2.2-10) des oberen Elements greift in die Klammer an der Oberseite des E-Punktes des unteren Elementes. In der Elementmitte konnte dies wie gesagt bei vier GEDT-Elementen nicht realisiert werden, die Dorne der U-Punkte mussten dort jeweils entfernt werden.

Weitere nachträgliche Verbundanker wurden verwendet, um einzelne Großelemente, die sich leicht „verzogen“ hatten, d. h. nicht mehr völlig eben waren, zu justieren. Der Grund der Unebenheit ist nicht genau bekannt, es kommt hier möglicherweise eine in Einzelfällen aufgetretene ungleichmäßige Belastung bei der Klebepressung (s. Abbildung 3.1-19) in Frage. Insgesamt wurden 13 Anker eingesetzt (davon 8 als Ersatz der mittleren U-Punkte). Der U-Wert der Elemente erhöhte sich dadurch im Mittel um ca. 0,007 W/m²K (s. Kapitel 2.6.6.2).



Abbildung 3.3-6: links: Ersatzkonstruktion (Fixierung mit Hilfe von zwei Edelstahl-Gewindestangen, die in den horizontalen Elementfugen in der Wand befestigt wurden), rechts: Anker in einer Vertikalfuge zur Justage

Auch die gesamte Montage erforderte eine laufende Qualitätskontrolle. Die Arbeiten erwiesen sich teilweise als zeit- und arbeitsaufwändiger als ursprünglich erhofft. Unter anderem waren hier folgende Ursachen festzustellen, die in Zukunft sicher größtenteils vermeidbar wären:

- Das eingesetzte Hebewerkzeug, ein Gabelstapler (Manitou Teleskoplader 2150) war für die beengten räumlichen Verhältnisse vor den drei Gebäuden zu groß. Dadurch war das Rangieren relativ zeitaufwändig.
- Die Einführungslasche am U-Punkt wurde entgegen der Planung nicht gefasst. Dadurch wurde das Einführen des oberen Elementes erschwert, da das Einschweben des oberen GEDT-Elementes in die Führungspunkte des E-Punktes auf ca. 1/10 Millimeter beschränkt wurde.
- Bei der Verladung der GEDT-Elemente im Werk wurde die Montagereihenfolge nicht beachtet. Dadurch mussten die Elemente bei der Montage vor Ort auf dem Ladebock umgesetzt werden.
- Die Abladung der GEDT-Elemente erfolgte ohne Berücksichtigung der Stapler-Größe auf einem Ladebock. Die Position des Ladebockes musste während der Montage geändert werden (siehe oben).
- Die Hartschaum-Abstandhalter zwischen den einzelnen Elementen waren zu dünn gewählt, so dass teilweise beim Anheben des jeweils vorderen Elementes die Fenster-Einfassung des dahinter stehenden Elementes durch überstehende Gewindestangen aus Befestigungspunkten (z. B. PW-Punkt) beschädigt wurde.

Bei der Vermessung der Fassade durch ein Vermessungsbüro traten an zwei Gebäuden Fehler auf, so dass einzelne der in die Wand eingebauten Stahlteile noch einmal korrigiert werden mussten. Weitere Korrekturen wurden dadurch erforderlich, dass einige der Gewindestangen zur Aufnahme der Stahlteile zu tief in die Fassade eingesetzt worden waren, d. h. nicht mehr genug Länge für die notwendigen Unterlegscheiben und Muttern zur Befestigung der Stahlteile vorhanden war (s. Abbildung 3.3-7). Die Ursachen lagen hier vor allem in Unebenheiten des Mauerwerks (Versatz einzelner Mauerziegel) und unterschiedlichen Abständen der zwei Mauerwerksschalen.



Abbildung 3.3-7: Zu kurze Gewindestangen für die Befestigung der Metallteile an der Fassade machten in Einzelfällen Nachbesserungen notwendig

Während der Montage wurden die Elemente immer zunächst probeweise angebracht, da nach Verfüllen des Mörtels in den W-Punkten an der Fassade nur noch kurzzeitig Korrekturen (ca. 90 Minuten) möglich waren. Das richtige Nachjustieren der Elemente war für die Monteure teilweise schwierig und kostete Zeit, insbesondere bei der Durchführung der Verschraubungen an den nicht leicht zugänglichen E-Punkten.

Die geplante Fugenbreite zwischen den Großelementen wurde schließlich sehr gut eingehalten. Geplant waren 10 +/- 5 mm, tatsächlich erreicht wurden im Mittel sogar weniger als 10 mm. An einzelnen Stellen traten allerdings Probleme dadurch auf, dass die Fugen zu eng waren und keine ausreichende Nachjustierung der Elemente mehr erlaubten. Hier wurde deshalb stellenweise dünneres Kompriband verwendet, was allerdings punktuell wiederum dazu führte, dass das Band die Fuge nicht völlig ausfüllte, so dass auch hier Nachbesserungen (Einbringen von PU-Schaum) notwendig wurden.

Die geringen Bautiefen der Fassade erfordern gleichzeitig auch geringste Abmessungen in den Befestigungssystemen, die mit Standardwerkzeugen verständlicherweise schwieriger zu bedienen sind. So ergaben sich durch Verschraubungen in der Nähe des Fensterrahmens zeitliche Verzögerungen,

Die bereits erwähnten leichten Unebenheiten einiger Elemente führten bei der Montage der Fassaden-Außenbekleidung (Harzkomposit-Platten) dazu, dass hier punktuell Ausgleichsmaßnahmen ergriffen werden mussten (Unterfüttern der Aluminium-Unterkonstruktion) (Abbildung 3.3-8).



Abbildung 3.3-8: Ausgleichsmaßnahme an der Unterkonstruktion der Fassadenbekleidung

Die Verklebung der Resoplanplatten ist an bestimmte klimatische Bedingungen geknüpft (Außentemperatur mindestens 5 °C, Luftfeuchtigkeit höchstens 75 %). Dieses Problem war bekannt, und es war deshalb angestrebt worden, die Montage noch vor Einbruch der Wintermonate abzuschließen. Der Zeitplan konnte zwar nicht ganz eingehalten werden, die letzten Arbeiten wurden aber bis zum 1. Dezember abgeschlossen. Die milde Witterung des Oktobers und Novembers 2006 hatte sich dabei als günstig erwiesen, winterliche Wetterbedingungen hatte es bis dahin noch nicht gegeben.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Aufwand und der Zeitbedarf für die Produktion und Montage der Großelemente mit Vakuumdämmung höher war, als man sich dies vielleicht zu Beginn des Projektes erhofft hatte und als es zukünftig für eine erfolgreiche Markteinführung derartiger Konzepte erforderlich wäre. Dies ist aber letztlich weder überraschend noch ungewöhnlich. Der Forschungs- und Pilotcharakter des gesamten Vorhabens wird hier deutlich. Bei der Entwicklung eines völlig neuartiger Fassadensystems und dessen Realisierung parallel zu einem laufenden Modernisierungsvorhaben handelte es sich um eine sehr schwierige und ehrgeizige Aufgabenstellung, die am Ende erfolgreich abgeschlossen wurde. Damit ist ein erster Schritt getan. Die aufgetretenen Schwierigkeiten zu beseitigen und das Konzept entsprechend weiterzuentwickeln, müsste die Aufgabe zukünftiger Forschungs- und Entwicklungsvorhaben sein. Auf die Entwicklungsperspektiven wird in Kapitel 8 noch näher eingegangen.

3.4 Ergebnisse der Mieterbefragung

Im Rahmen der wissenschaftlichen Begleitung des Forschungsprojekts wurde auch eine Mieterbefragung durchgeführt. Die Ergebnisse im Hinblick auf das Modernisierungsvorhaben als Ganzes werden in dem Endbericht zum Gesamtprojekt dokumentiert werden. An dieser Stelle sind die Ergebnisse im Hinblick auf die Großelement-Dämmtechnik mit Vakuumdämmung wiedergegeben. Dabei ist natürlich zu beachten, dass die Anzahl von sechs bzw. bei einigen Fällen nur drei befragten Haushalten gering ist und dass die

Erfahrungen, die hier in dem ersten Pilotprojekt mit seinen Anfangsschwierigkeiten und Zeitverzögerungen gemacht wurden, nicht einfach auf die Anwendung einer ausgereiften Technologie übertragen werden können. Insofern konnte es hier nur darum gehen, ein erstes „Stimmungsbild" aus Sicht der Bewohner zu ermitteln.
Die Befragungen der Mieterinnen und Mieter in Hofheim waren zeitlich so organisiert, dass die unterschiedlichen Bauphasen abgebildet werden konnten. Die erste Befragung fand im Mai 2005 statt, um den Zustand vor der energetischen Sanierung zu erheben. Hier wurde bezüglich der Bewertung der Wohnungen die Ausgangssituation festgestellt, um sie mit den Werten späterer Befragungen vergleichen zu können. Die zweite Befragung wurde im Oktober 2005 – zur Zeit der größten baulichen Tätigkeit – durchgeführt, um das Ausmaß der individuellen Belastungen auf Seiten der Bewohnerinnen und Bewohner zu erfassen. Im April 2006 wurden die Mieterinnen und Mieter ein drittes Mal befragt. Zu diesem Zeitpunkt war die konventionell durchgeführte energetische Sanierung abgeschlossen. Mit der vierten Befragung im April 2007 konnten dann auch die Erfahrungen mit der Installation der Großelement-Dämmtechnik mit Vakuumdämmung erfragt werden. Drei der sechs Haushalte blieben während der Sanierung in ihren Wohnungen; mit diesen konnten alle Befragungen durchgeführt werden. Die anderen drei Haushalte sind erst nach Abschluss der konventionellen Dämmarbeiten jedoch vor Installation der GEDT in die Wohnungen in der Wilhelmstraße eingezogen. Mit dieser Gruppe konnte nur die vierte Befragung durchgeführt werden. Während die „Altmieter" sowohl die konventionelle Dämmung als auch die GEDT beurteilen können, konnten die „Neumieter" lediglich Erfahrungen mit der Installation der Großelemente Dämmtechnik mit Vakuumtechnik sammeln.

Die Ergebnisse der Befragung hinsichtlich der GEDT mit Vakuumdämmung sind im Folgenden dokumentiert:
Fünf der sechs Befragten hatten im Rahmen der Sanierungsarbeiten bzw. anlässlich ihres Wohnungswechsels von der GEDT mit Vakuumdämmung gehört. Einem Neumieter war die Technik zum Zeitpunkt der Befragung noch unbekannt.
Die in der folgenden Tabelle 3.4-1 dokumentierte Abfrage diente dazu, eine pauschale Gesamteinschätzung der Dämmtechnologie durch die Mieter zu erhalten.

Tabelle 3.4-1: Bewertung von GEDT mit Vakuumdämmung[4]

Bewertung von GEDT	Häufigkeit
Sehr gute Dämmung, funktioniert super	2
Technisch interessant	1
Nichts hat zusammen gepasst	1
Hat alles zu lange gedauert, zu hoher Aufwand	2
Gesamt	6

Zwar wird GEDT mit Vakuumdämmung positiv bewertet, was die Funktionsweise – also die Dämmung anbelangt, der Aufwand, wurde allerdings als recht hoch empfunden.
Da die drei Altmieter-Haushalte sowohl die konventionelle Gebäudedämmung als auch die Dämmung mit GEDT mit Vakuumdämmung im Verlaufe der Sanierung kennen gelernt haben, wurden sie gebeten, diese beiden Verfahren im Hinblick auf die Belastungen, die sie hervorrufen, zu bewerten (Tabelle 3.4-2).

[4] Mehrfachnennungen waren möglich. Ein Befragter hatte sich nicht geäußert, ein anderer zwei Antworten gegeben.

Tabelle 3.4-2: Belastungen im Vergleich beider Dämmtechniken

	Lärm	Dreck und Staub	Unordnung in der Wohnung	Eingeschränkte Nutzbarkeit der Wohnung	Handwerker in der Wohnung	Zeitaufwand
Viel niedriger	1	-	-	-	-	-
Eher niedriger	-	1	-	-	-	-
Genauso	2	1	1	2	3	-
Eher höher	-	-	-	-	-	-
Viel höher	-	1	-	-	-	2

Einig sind sich die Bewohnerinnen und Bewohner in der Frage nach der eingeschränkten Nutzbarkeit und der Anwesenheit durch Handwerker in der Wohnung, dass die Belastungen vergleichbar sind. Bezüglich der Belastung durch Dreck und Staub zeigten sich die Bewohnerinnen und Bewohner unterschiedlich in ihrer Wahrnehmung. Der Zeitaufwand wird bei der Großelement-Dämmtechnik mit Vakuumdämmung als deutlich höher eingeschätzt, was aufgrund der durch den Pilotcharakter des Projekts verursachten Verzögerungen nicht überraschen kann. In punkto Lärm zeichnen sich leichte Vorteile für die GEDT mit Vakuumdämmung ab[5].
Sowohl Altmieter als auch Neumieter hatten am Ende des Fragebogens die Möglichkeit anzugeben, wie belastend sie die einzelnen Arbeitsschritte bei der Montage der GEDT mit Vakuumdämmung empfanden (Tabelle 3.4-3).

Tabelle 3.4-3: Belastungen bei den unterschiedlichen Arbeitsschritten der GEDT-Montage bzw. durch das Vorhandensein von Absperrungen und Bauzäunen

	Bohrungen für die Wandbefestigung	Aufhängen der Dämmelemente	Verkleben der Fassadenverkleidung	Herausnehmen der alten Fenster	Absperrungen und Bauzäune
Sehr hoch	3	-	-	3	3
Eher hoch	3	1	1	2	-
Mittelmäßig	-	3	1	-	-
Eher niedrig	-	2	3	1	2
Sehr niedrig	-	-	1	-	-

Die Belastungen durch die Bohrungen für die Wandbefestigung werden von den Befragten einheitlich als eher hoch oder sehr hoch bewertet. Als überwiegend hoch werden auch die Belastungen beim Herausnehmen der alten Fenster angesehen. Dieser Arbeitsschritt ist allerdings als Teil des normalen Modernisierungsprozesses zu sehen und hängt nicht ausschließlich mit der Großelement-Dämmtechnik zusammen. Die Belastung durch das Verkleben der Fassadenverkleidung wird eher als niedrig empfunden. Uneinig sind sich die Befragten über die Belastung beim Aufhängen der Fassadenverkleidung und durch das Vorhandensein von Absperrungen und Bauzäunen.

[5] Diese Aussage ist allerdings etwas mit Vorsicht zu interpretieren, da in der folgenden Frage die Belastungen durch die Bohrungen, die in nicht unerheblichem Maße mit Lärm verbunden waren, als hoch eingestuft wurden.

4 Temperatur- und Feuchtemessung

Zur Überprüfung des Verhaltens und der Funktionsweise der Vakuumpaneele in den GEDT-Elementen wurden zwei verschiedene Messeinrichtungen installiert: Handmessungen von Temperaturen, die eine Funktionskontrolle aller VIPs ermöglichen sollen und kontinuierliche Messungen mit kombinierten Temperatur-/Feuchtefühlern, die stündliche Messwerte der Temperaturen und Ausgleichsfeuchten an einzelnen Punkten eines GEDT-Elements erlauben.

4.1 Messeinrichtung zur Funktionskontrolle VIP

Die Vakuumdämm-Paneele in den Großdämmelementen sollten nach der Montage in Hofheim auf ihre Funktionsfähigkeit hin überprüft werden können. Eine thermografische Überprüfung war kaum möglich, da eine hinterlüftete Fassadenbekleidung als äußerer Abschluss gewählt wurde und somit erhöhte Temperaturen auf der Außenseite eines GEDT-Elements aufgrund eines Defekts kaum erkennbar wären.
Zur Funktionskontrolle wurde auch der (zumindest partielle) Einsatz von Funksensoren in RFID-Technik diskutiert, allerdings standen diese Sensoren zum Zeitpunkt der Fertigung der VIPs nicht in nennenswertem Umfang zur Verfügung.
Als alternatives Verfahren für Handmessungen an den einzelnen VIPs wurde aus diesem Grund bei der Fertigung der Elemente jeweils mittig hinter dem VIP in die Kerto-Platte eine Bohrung mit ca. 0,5 cm Durchmesser vorgesehen. In jede dieser Bohrungen wurde vor dem Transport der Elemente nach Hofheim durch das IWU ein Temperaturfühler vom Typ PT100 Klasse A eingeklebt und mit Flachbandkabel in Dreileitertechnik zur zentralen Klemmstelle am Rand des GEDT-Elements verbunden. Von dieser Klemmstelle wurde ein Rundkabel (bis zu 20 m) bis in den Keller gezogen. Dadurch ist es möglich durch eine Messung der Temperaturdifferenz zwischen außen (hier ist zusätzlich an jedem GEDT-Element je eine Messstelle auf der Außenseite der BFU-Platte montiert) und der warmen Seite der VIPs vorzunehmen.

4.1.1 Messprinzip

Wird ein VIP-Element belüftet, steigt die Wärmeleitfähigkeit sprunghaft an, und dadurch verändern sich die Temperaturverhältnisse im Schichtaufbau. Abbildung 4.1-1 zeigt die prinzipielle Temperaturverteilung für ein GEDT-Element mit funktionsfähigem VIP (rote Linie) und eines mit defektem VIP (blaue Linie). Die maximal messbare Temperaturdifferenz (auf der Innenseite des VIPs) beträgt 7,4 K (bei 30 K Temperaturdifferenz), aber auch in der Kerto-Platte sind immer noch 6,9 K Unterschied zu messen, wenn die Außentemperatur auf -10 °C fällt. Sowohl bei den inneren als auch bei den äußeren Oberflächentemperaturen liegt die messbare Differenz bei ca. 0,6 K, so dass durch die immer vorhandenen Störeinflüsse und instationären Verhältnisse eine Bestimmung der Funktionsfähigkeit kaum möglich ist.

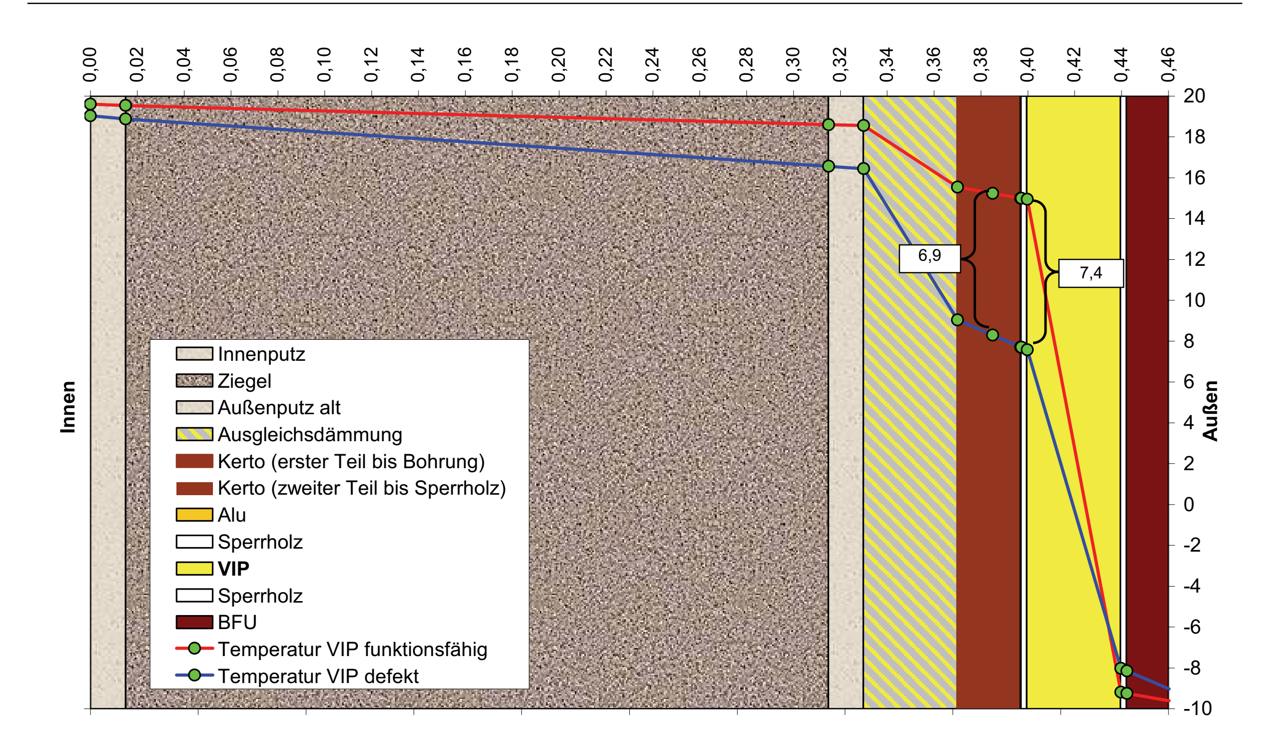


Abbildung 4.1-1: Temperaturverlauf im Schichtaufbau mit funktionsfähigem und defektem VIP bei 4 cm Ausgleichsdämmung und 30 K Temperaturdifferenz

Durch Temperaturfühler, die in die Wandseite der Kerto-Platte, mittig über jedem VIP eingelassen und bereits im Werk verdrahtet werden, kann somit ein defektes VIP erkannt werden.

Die Erfahrungen bei der Montage zeigen, dass die Wände vergleichsweise eben waren und somit nicht davon auszugehen ist, dass die Ausgleichsdämmung stärker komprimiert wurde. Sollte dies doch der Fall sein, verändert sich der Messwert, es ist jedoch selbst bei 2 cm Ausgleichsdämmung immer noch ein deutlicher Temperaturunterschied zu messen (siehe folgendes Diagramm mit 5,7 K Temperaturdifferenz in der Kerto-Platte) (Abbildung 4.1-2).

Diese Differenz zwischen funktionsfähigem und defektem VIP wird von einer Temperaturverschiebung von 1,2 K zwischen den beiden Dicken der Ausgleichsdämmung überlagert. Außerdem kann aus dem Diagramm abgelesen werden, dass an Stellen mit dünn zusammengepresster Ausgleichsdämmung das Temperaturniveau an den Messpunkten insgesamt um ca. 2,5 K höher liegt.

Die Messung dauert ca. 4 Minuten pro GEDT und ist auch bei höheren Außertemperaturen (z. B. bei +5 °C noch 3,5 K Temperaturdifferenz bei 4 cm Dämmung - Abbildung 4.1-3 - bzw. 2,8 K bei 2 cm Ausgleichsdämmung – Abbildung 4.1-4) noch möglich. Dann verschiebt sich das Temperaturniveau bei unterschiedlichen Dicken der Ausgleichdämmung um 1,3 K, so dass sich jedoch mehrere Effekte überlagern und die Interpretation schwieriger wird.

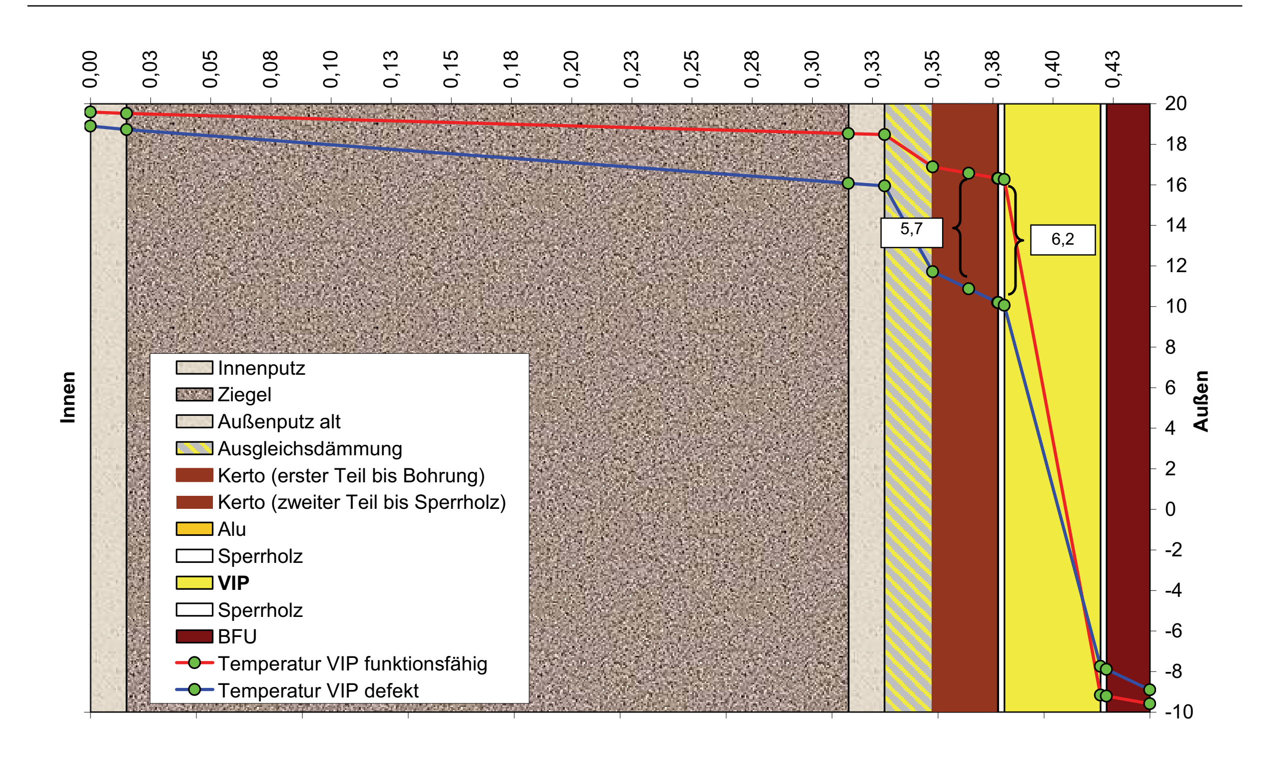


Abbildung 4.1-2: Temperaturverlauf im Schichtaufbau mit funktionsfähigem und defektem VIP bei 2 cm Ausgleichsdämmung und 30 K Temperaturdifferenz

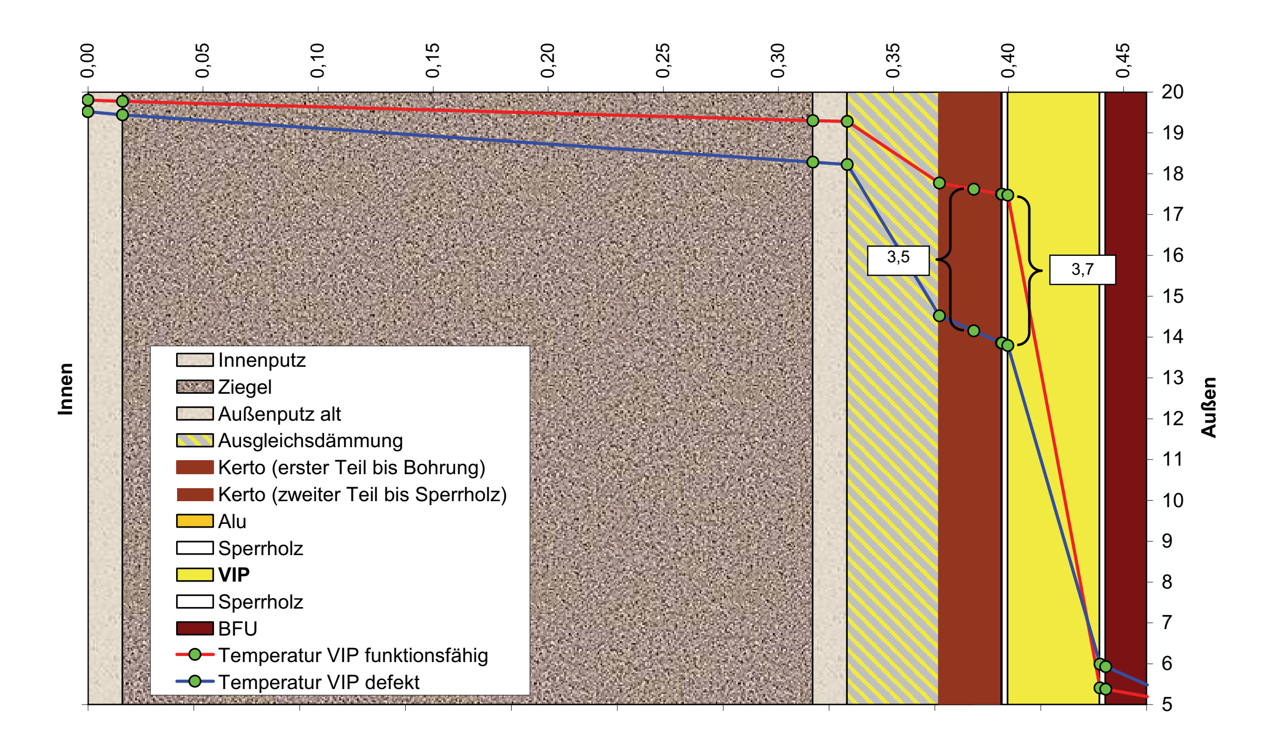


Abbildung 4.1-3: Temperaturverlauf im Schichtaufbau mit funktionsfähigem und defektem VIP bei 4 cm Ausgleichsdämmung und 15 K Temperaturdifferenz

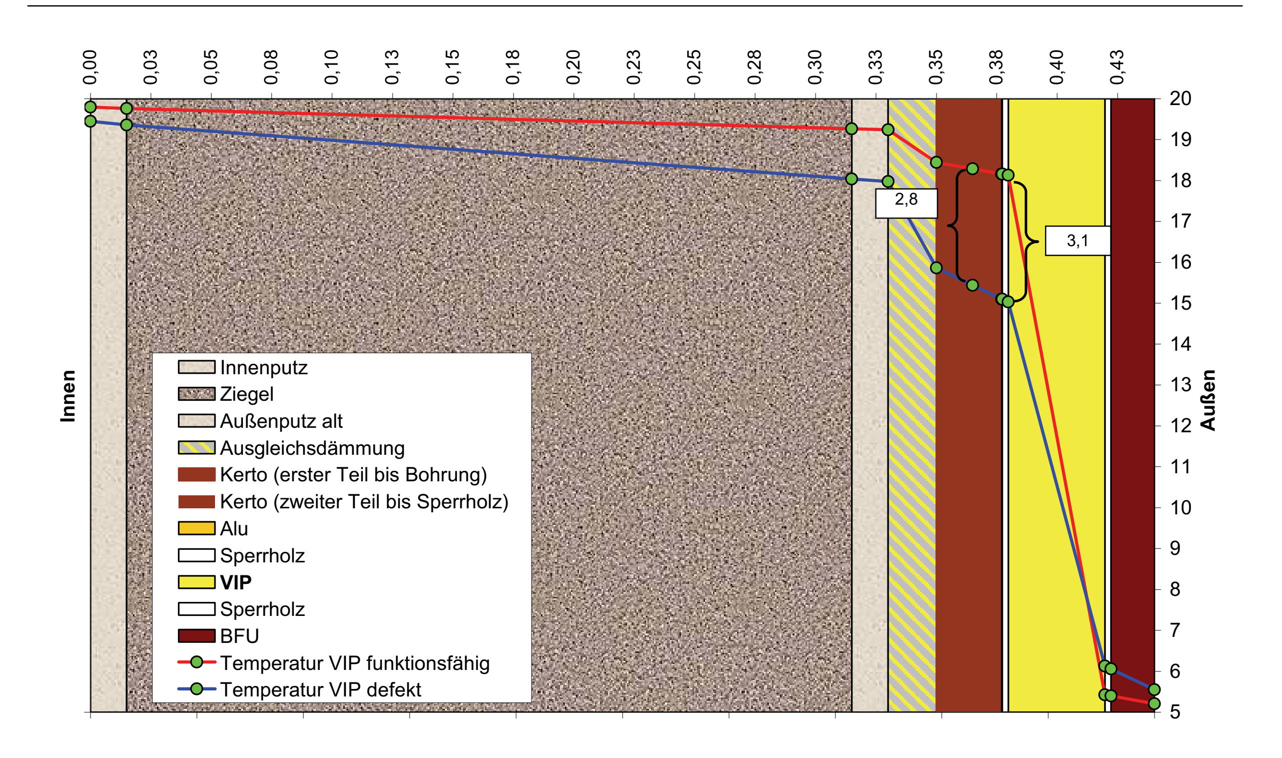


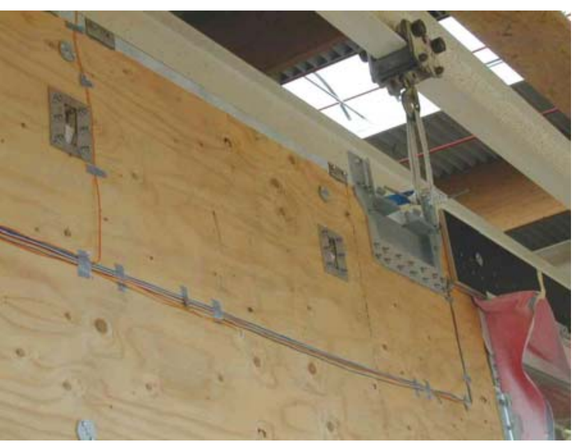
Abbildung 4.1-4: Temperaturverlauf im Schichtaufbau mit funktionsfähigem und defektem VIP bei 2 cm Ausgleichsdämmung und 15 K Temperaturdifferenz

4.2 Montage

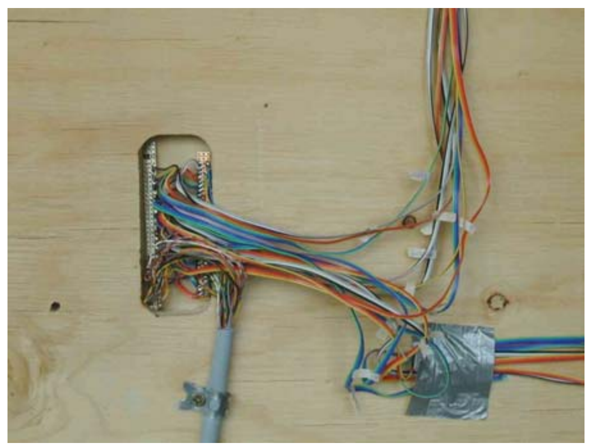
Alle GEDT-Elemente erhielten in der Mitte jedes VIPs in der Kerto-Platte je einen Temperaturfühler vom Typ PT100 Klasse A, der in Dreileitertechnik an einem Flachbandkabel angeschlossen wurde. Alle Anschlusskabel wurden zum Klemmkasten am Außenrand des GEDT-Elements geführt und dort mit einem Rundkabel verlötet. Das Rundkabel wurde aufgerollt, mit dem Element transportiert und nach dem Einhängen des Elements an den K- und M-Punkten vorbei zum Hausanschlussraum geführt, wo das Kabel in einem Klemmkasten an einen 36-poligen Sub-D-Stecker angeschlossen wurde. Abbildung 4.2-1 zeigt die einzelnen Schritte der Montage der Messtechnik.



Der Temperaturfühler wird in die Kertoplatte eingeklebt und fixiert.



Alle Fühlerkabel werden zusammen zum Klemmkasten geführt


Im Klemmkasten werden alle Einzelfühler auf das Rundkabel geklemmt


Zum Schluss werden Fühler und Kabel mit Butylklebeband geschützt


Das Rundkabel beim Verlegen hinter dem GEDT in den Keller


Fertiger Anschlusskasten mit Stecker zur Messung

Abbildung 4.2-1: Ablauf der Messtechnikmontage

Ein 16-poliger Messstellenumschalter und ein Modul zur Datenauslesung[6] wurden in ein mobiles Gehäuse montiert, um die Funktionsmessungen vor Ort mit einem Laptop durchführen zu können.

4.3 Ergebnisse der Funktionskontrolle

Am 12.12.06, 20.12.06, 12.02.07 und am 22.03.07 wurden in den Morgenstunden (Vortag ohne Sonnenschein, Nacht bedeckt) die Temperaturen der VIPs gemessen. Die Außentemperaturen lagen zwischen 8 °C und. 2 °C.
Am 12.12.06 fehlte die Perimeterdämmung und beim Ortstermin fielen noch Hohlräume in der Dämmstofffüllung der Arbeitsfugen zwischen WDVS und GEDT auf. Am 20.12. war die Perimeterdämmung montiert (seit ca. 3 - 4 Tagen), die Hohlräume sollten von der ausführenden Firma ausgespritzt werden.
Die bei den Messungen ermittelten Temperaturen wurden mit theoretisch berechneten Temperaturen im GEDT-Schichtaufbau an der Stelle der Temperaturfühler mit den für diese Stunde gemessenen Innen- und Außentemperaturen verglichen. Bei diesen Berechnungen wurde die Differenz zwischen der theoretisch bestimmten Temperatur am Fühler und der gemessenen Temperatur als Untertemperatur bestimmt.

[6] Eine ausführliche Dokumentation der Gebäudemesstechnik wird in dem für Anfang 2008 geplanten Endbericht über das Gesamtprojekt erfolgen.

4.3.1 Erläuterung der Messkurven

Abbildung 4.3-1 zeigt den unkorrigierten Verlauf der Untertemperatur zwischen theoretischem und gemessenem Wert in Abhängigkeit vom Abstand des Fühlers von der linken Gebäudeecke (bei Außenansicht). Je höher die Untertemperatur ausfällt, desto kälter ist der jeweilige Punkt in der Konstruktion und umso wahrscheinlicher ist ein defektes VIP vorhanden. Allerdings überlagern eine Reihe von Effekten die Messwerte, die bei der Interpretation berücksichtigt werden müssen. Einerseits liegt die tatsächliche Raumtemperatur in der Nähe der Außenwand niedriger als die gemessene Raumtemperatur, die in einer Innenwand aufgenommen wird. Dabei beeinflussen Möblierung und Vorhänge die an der Innenwand vorhandene Temperatur. Zusätzlich verschieben Heizkörper die Wandtemperatur nach oben, da Wärme direkt auf die Wand gestrahlt wird. Aus diesem Grund treten bei den mittleren Messpunkten der GEDT teilweise höhere Temperaturen auf, als theoretisch zu erwarten wären. Schließlich sind instationäre Situationen (starke Änderung der Raum- oder Außentemperatur innerhalb einer von der Wärmekapazität beeinflussten Zeit) und geometrische Effekte zu berücksichtigen.

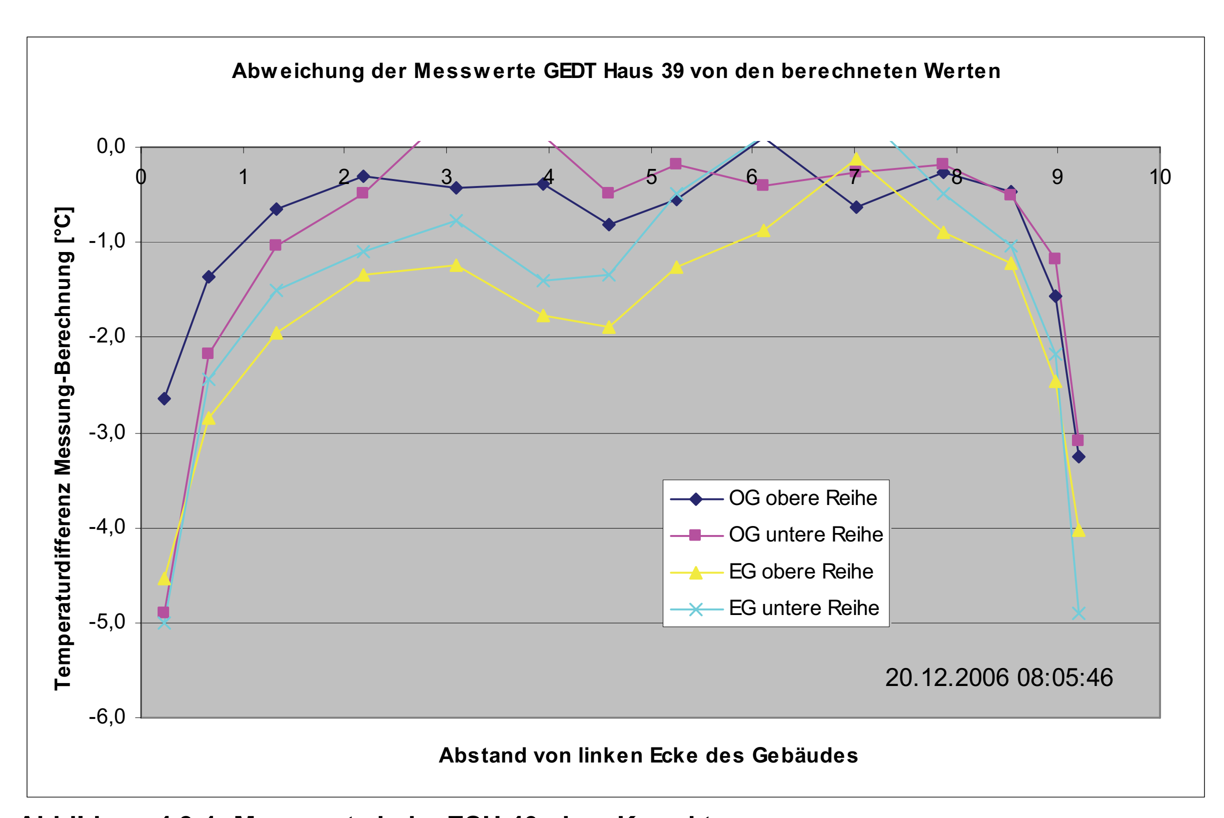
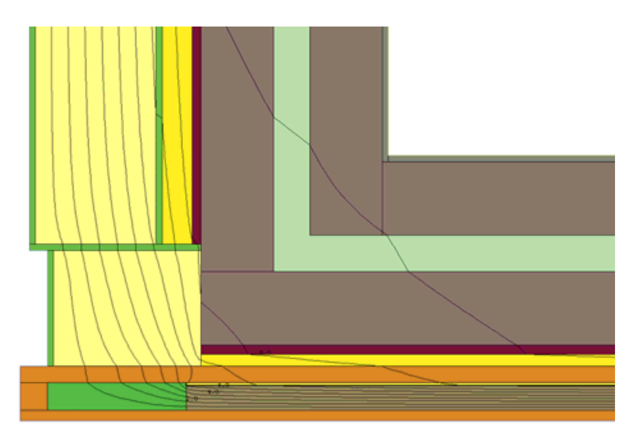


Abbildung 4.3-1: Messwerte beim ESH 40 ohne Korrekturen

In Abbildung 4.3-1 sind für das ESH 40 einige der genannten Effekte zu erkennen. Besonders auffällig sind die abfallenden Temperaturen an den Gebäudeecken. Dies ist durch die geometrische Wärmebrücke am Übergang von GEDT an das WDVS zu erklären. Die Temperaturen der VIPs aller Häuser nehmen zur Gebäudeecke hin bis zu 6 °C ab, im Mittel liegt die Abnahme zwischen 3 °C und 5 °C.
Aus diesem Grund wurde für die Gebäudeecke ein Korrekturfaktor f_{Ecke} aus der Wärmebrückenberechnung des Details bestimmt, der in Abbildung 4.3-2 dargestellt ist. Der Korrekturfaktor liegt abhängig von der Lage des Messpunktes zur Altwandkante zwischen 0,86 und 1,00.



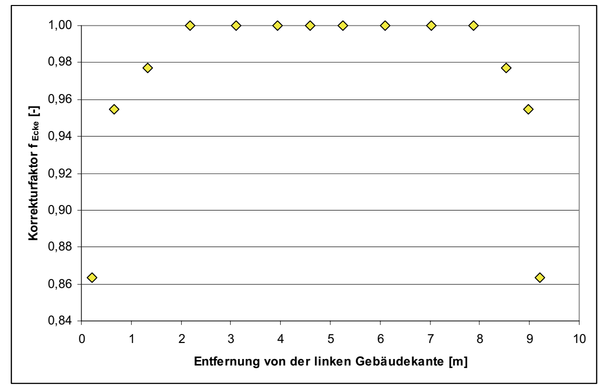


Abbildung 4.3-2: Isothermendarstellung der Ecke „GEDT an WDVS" (links) und Werte des Korrekturfaktors f_{Ecke} (rechts)

Um den Einfluss der Wärmebrücke an dem Übergang zur Perimeterdämmung zu berücksichtigen, wurde ein zweiter Korrekturfaktor für die unterste Reihe der Messfühler mit 0,99 eingeführt. Dieser Einfluss ist also relativ gering.
Die Fugen zwischen den GEDT-Elementen haben kaum einen Einfluss auf den Verlauf der Temperaturen im Bauteil, wenn sie korrekt ausgeführt sind.
Werden die beiden Korrekturfaktoren bei der Auswertung berücksichtigt, ergibt sich folgende Situation für das ESH 40 (Abbildung 4.3-3):

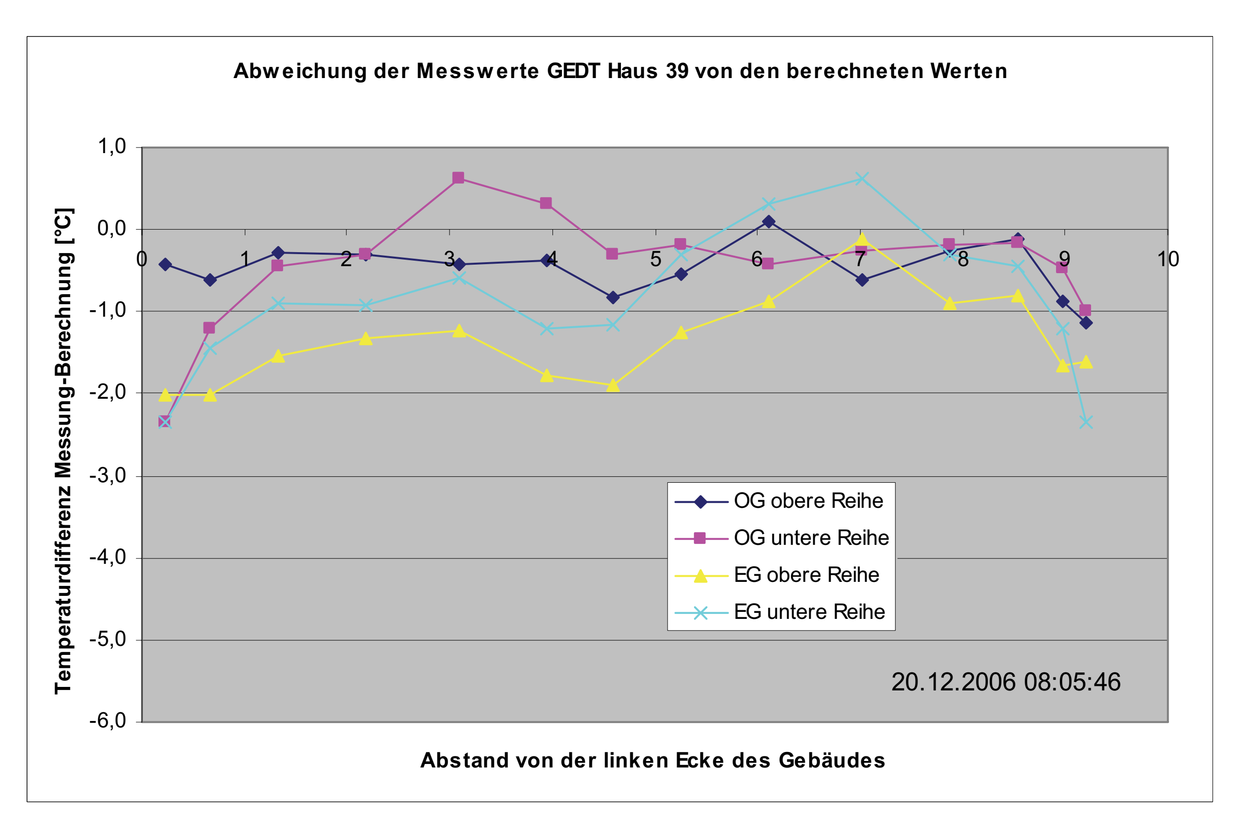


Abbildung 4.3-3: Korrigierte Messwerte für ESH40

Anfang und Ende der Kurven an der Gebäudekante fallen nun weit weniger stark ab als im unkorrigierten Zustand. Die verbleibenden Schwankungen resultieren aus Variationen in der Dicke der Ausgleichsdämmung, der Ausführungsgüte der Details sowie Messunsicherheiten bei Fühlern und Messwandler, die im Bereich < 0,5 K liegen. Bei den Berechnungen wird von einer Dicke der Ausgleichsdämmung von 4 cm ausgegangen. Fällt diese geringer aus, so

kann die (Soll-)Temperatur an der Messstelle um bis zu 1,3 K höher liegen (Ausgleichsdämmung nur 2 cm dick).
Weitere Unschärfen bei der Auswertung entstehen durch ggf. vorhandene Luftbewegungen im Hohlraum der Ziegelwand und der Temperaturverteilung im Innenraum (in Haus 37 und 39 OG reicht der Nordostraum über die gesamte Gebäudetiefe, die Temperaturmessung findet im südlichen Teil des Raumes statt). Zusätzlich beeinflussen instationäre, d. h. zeitlich stark unterschiedliche Innentemperaturen die Messergebnisse. Bei der Messung am 20.12. tritt dieser Effekt auf, da am 19.12. in Haus 35 EG die Raumtemperatur um ca. 2 °C abgesenkt wurde.
Schließlich kann durch die unter den Fenstern montierten Heizkörper lokal zusätzlich Wärme in die Wand eingetragen werden, die zu einer höheren gemessenen Temperatur führt, als theoretisch berechnet wurde. Dieser Effekt ist in Abbildung 4.3-3 in EG und OG jeweils bei der unteren Reihe zu erkennen.

4.3.2 Identifizierung defekter VIPs

Ergebnisse im Haus 39 (ESH 40)
Die folgende Abbildung 4.3-4 zeigt für die Messung am 22.03.07 die Differenz der (korrigierten) Messwerte vom Sollwert und die Grenzkurven für defekte VIPs. Diese Grenzkurven geben die Differenzen vom Sollwert an, die bei defekten VIPs zu erwarten wären. Durch den großen Abstand der gemessenen Werte von den Grenzkurven wird plausibel, dass die Schwankungen der Einzelmesspunkte – unter Berücksichtigung der Messtoleranz – durch Schwankungen in der Ausführung und nicht etwa durch defekte VIPs zustande kommen. Hier sind besonders die Verläufe in der Mitte des Erdgeschosses zu nennen. Bei der Montage wurde ein zu schmales Kompriband eingesetzt, so dass die Fuge nachträglich mit PU-Schaum gefüllt wurde. Allerdings waren nicht mehr alle Stellen zugänglich, was die niedrigeren Temperaturen erklären könnte.
Ein schleichender Anstieg der Wärmeleitfähigkeit der VIPs ist bei der eingesetzten Messmethode aufgrund der Unsicherheiten nicht zu ermitteln. Da bei defekten VIPs die Wärmeleitfähigkeit aber schlagartig ansteigt, kann für dieses Gebäude von 100 % funktionsfähigen VIPs ausgegangen werden.
Die an den drei Gebäuden in verschiedenen Höhen gemessenen Außentemperaturen wiesen eine leichte Streuung von weniger als 1 °C auf. Es kann davon ausgegangen werden, dass die mittlere Außentemperatur ungefähr mit einem Fehler von 1 °C bestimmt werden konnte und die Streuung zwischen den Fühlern gering ausfällt.

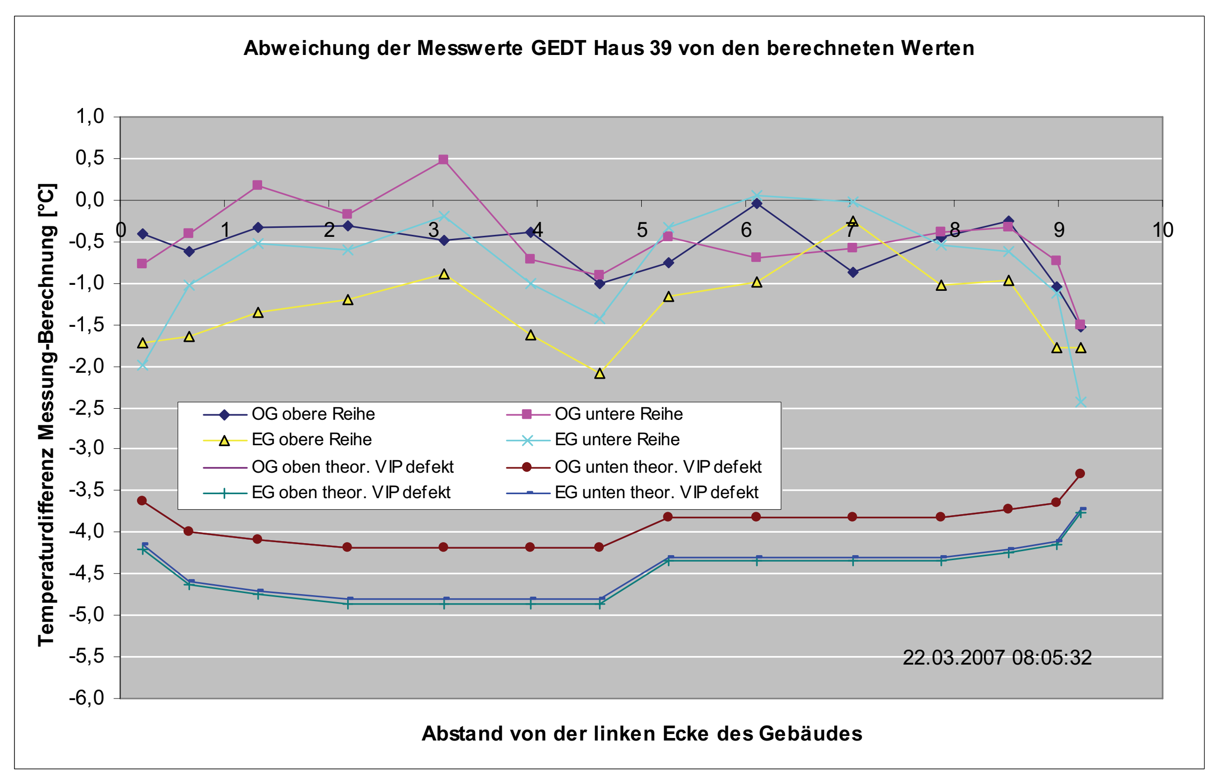


Abbildung 4.3-4: Vergleich der korrigierten Messwerte mit den Grenzkurven für defekte VIPs

Ergebnisse im Haus 37 (EnEV-Neubau-Standard)

Für Haus 37 zeigt die folgende Abbildung 4.3-5 die Messergebnisse. An drei Stellen ergeben sich die Messwerte, die bei einem defekten VIP erwartet werden.

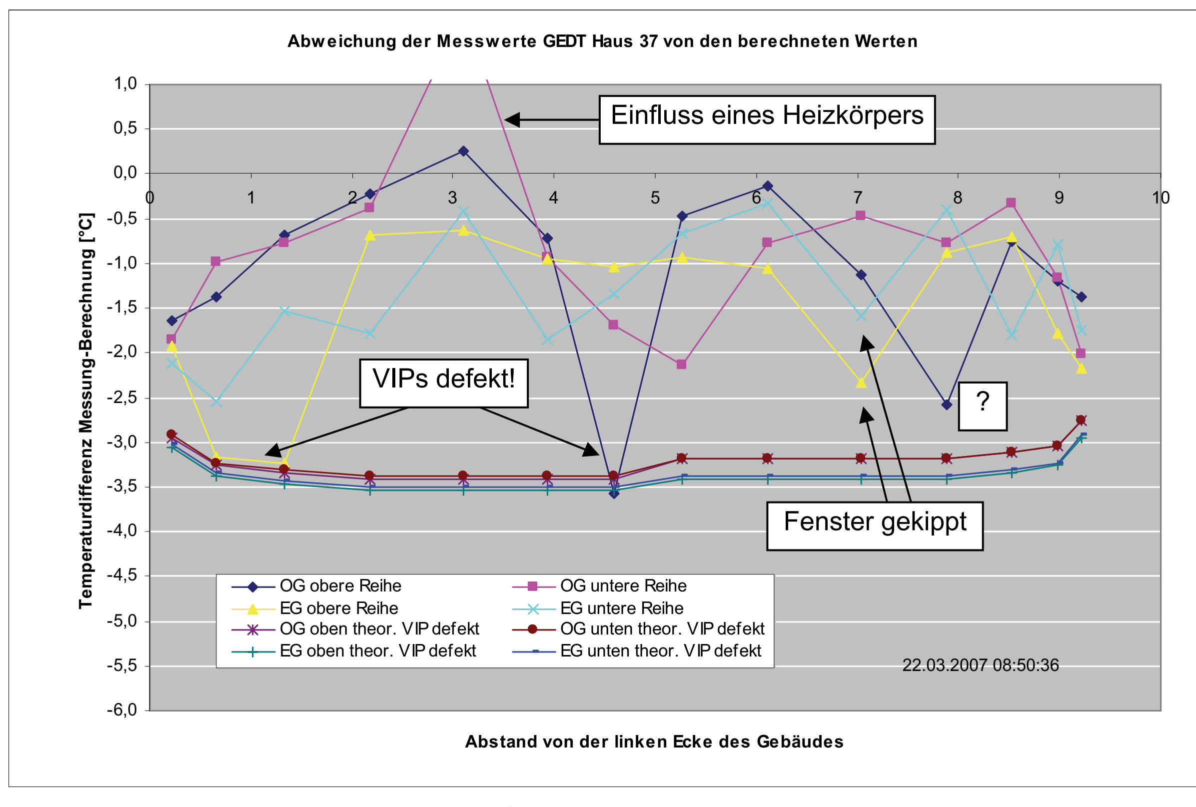


Abbildung 4.3-5: Korrigierte Messwerte für das EnEV-Neubau-Haus

Bei den beiden defekten VIPs der oberen Reihe im EG links stellt sich die Frage, ob z. B. ein defektes VIP nicht die Temperatur am Nachbarelement so weit absenkt, dass besonders bei schmalen Paneelen der Eindruck entstehen könnte, ein funktionsfähiges VIP sei defekt. Um diese Frage zu klären, wurde für verschiedene Breiten defekter VIPs ein Korrekturfaktor für die Temperaturdifferenz am Nachbar-VIP mit einem Wärmebrückenprogramm berechnet. Abbildung 4.3-6 zeigt diese Korrekturfaktoren in Abhängigkeit des Abstandes eines Messpunktes von der Außenkante des defekten VIPs.

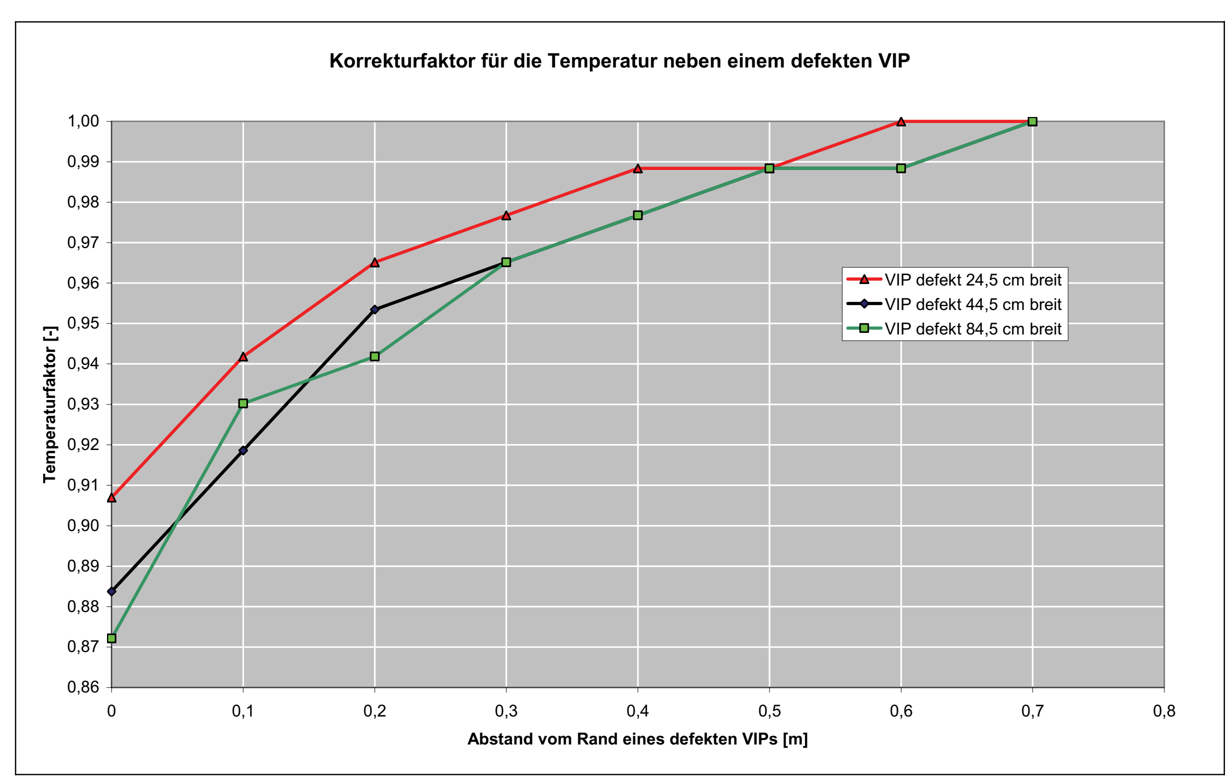


Abbildung 4.3-6: Temperaturfaktor zur Korrektur der Temperaturen neben einem defekten VIP

Beim fraglichen zweiten VIP im EG links oben mit einer Breite von nur 45 cm und einem daneben liegenden defekten VIP von 65 cm Breite führt dieser Korrekturfaktor zu einer Temperaturreduktion um 0,5 °C. Die gemessene Temperatur weicht aber um mehr als 1 °C vom funktionsfähigen Zustand ab, so dass hier wahrscheinlich tatsächlich zwei defekte VIPs nebeneinander vorliegen.

Die beiden defekten VIPs liegen in dem GEDT-Element im Erdgeschoss, das als erstes Musterelement[7] gebaut wurde, längere Zeit im Freien gelagert wurde, keine zweite Sperrholz-Schutzschicht besitzt und an dem vor der Montage einige Schweißarbeiten zur Nachbesserung durchgeführt wurden. Hier ist es wahrscheinlich, dass die beiden VIPs bereits vor der Montage defekt waren. Bei allen anderen defekten VIPs liegen keine Anhaltspunkte vor, wann der Defekt eingetreten ist.

Die beiden Ausreißer auf der rechten Seite von Abbildung 4.3-5, die mit „Fenster gekippt“ gekennzeichnet sind, entsprechen den VIPs unter und über dem Fenster. In diesem Raum war vor der Messung über länger Zeit das Fenster gekippt, wobei durch die einströmende Kaltluft die Wand im Bereich dieser VIP abgekühlt wurde, so dass diese Abweichungen nach unten gut erklärt werden können und nicht mit defekten VIPs in Zusammenhang stehen.

[7] s. Kap. 3.3

Für den mit einem Fragezeichen gekennzeichnete Messpunkt kann bisher keine Erklärung gefunden werden. Da in den Nordräumen dieses Hauses bei allen Messungen vergleichsweise niedrige Raumtemperaturen von im Mittel 17,8 °C vorlagen, waren die Temperaturdifferenzen nach außen deutlich geringer als bei den anderen Häusern. Hier sind im folgenden Winter noch weitere Messungen bei Frosttemperaturen sinnvoll, um auch die Ausreißer im rechten Fassadenteil eindeutig beurteilen zu können.

Ergebnisse im Haus 35 (ESH 60)

Schwierig ist zurzeit die Interpretation der Ergebnisse von Haus 35 (Abbildung 4.3-7). In der linken Hälfte des Diagramms (linke Haushälfte) ist im Erd- und Obergeschoss je ein defektes VIP zu erkennen.

Im Obergeschoss liegen die Messwerte links deutlich niedriger, rechts deutlich höher als eigentlich zu erwarten wäre. Dieser Effekt trat bei anderen Messungen in diesem Haus nicht auf und liegt hier möglicherweise an einer Ungenauigkeit bei der Bestimmung der Temperaturen auf der GEDT-Innenseite, für die immer die Lufttemperaturen des jeweils dahinter liegenden Wohnraumes angesetzt wurden. Im vorliegenden Fall lagen deutlich unterschiedliche Messwerte für den linken und den rechten Wohnraum vor (Temperaturdifferenz 2 K). Es ist aber sehr wahrscheinlich, dass diese Temperaturdifferenz nicht bei den GEDT-Elementen „ankommt“, da dazwischen ja noch die Luftschicht des zweischaligen Mauerwerks liegt, durch die sich die Temperaturunterschiede zwischen der linken und rechten Haushälfte vermutlich ausgleichen. Unabhängig von diesem Effekt ist festzustellen, dass im OG rechts keine VIPs defekt sind.

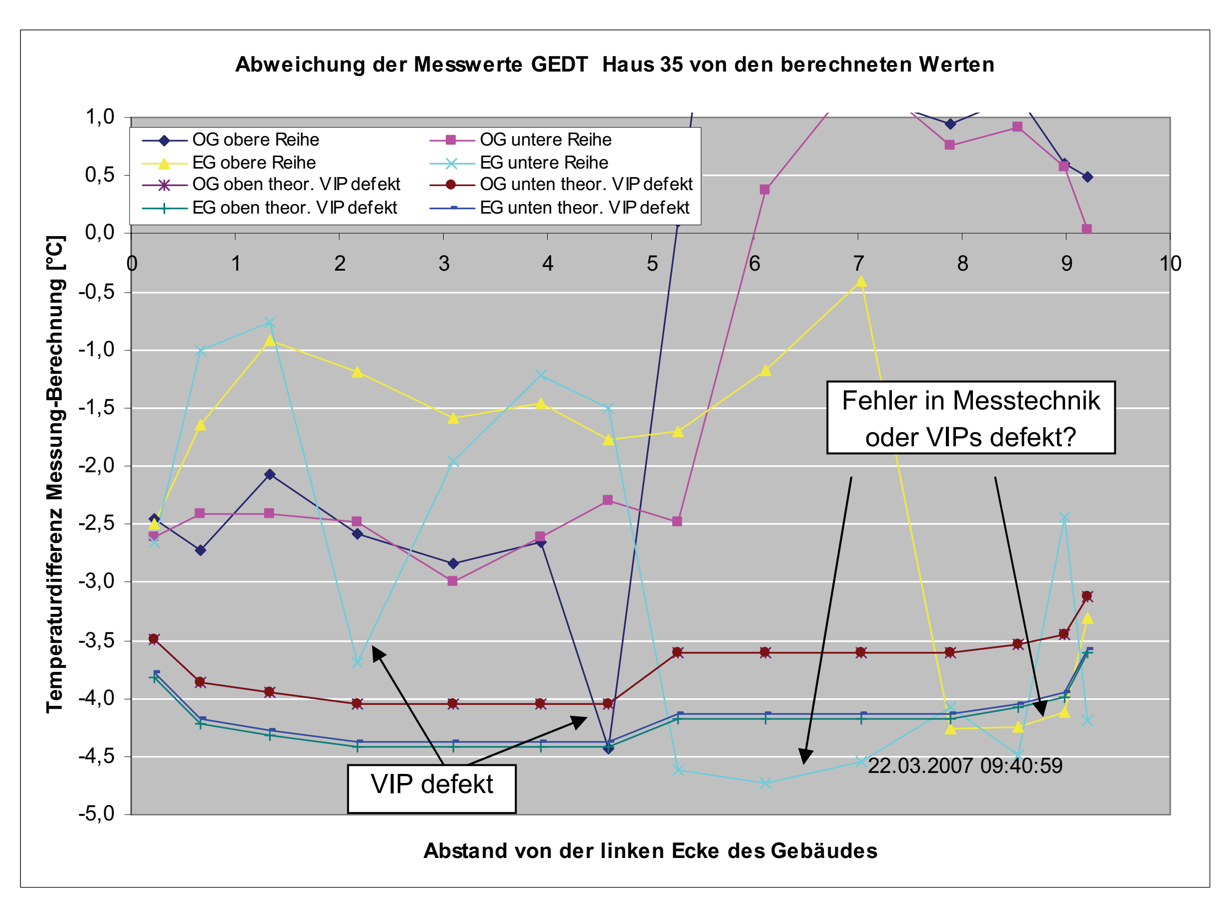


Abbildung 4.3-7: Korrigierte Messergebnisse von ESH60

Für die Messwerte im Erdgeschoss rechts ergibt sich für sechs der sieben Messpunkte in der unteren Reihe scheinbar die Situation von defekten VIPs, was aufgrund der Resultate der übrigen GEDTs aber nicht sehr wahrscheinlich ist. Auch bei der oberen Reihe im EG sind ebenfalls vier Punkte mit Temperaturmesswerten, die defekten VIPs entsprechen. Hier könnte ein Problem mit den Kabeln der Fühler vorliegen (z. B. Tackerklammern bei Befestigung der Ausgleichsdämmung oder mechanische Beschädigung bei der Montage), da alle diese Fühler über eine Klemmstelle und ein gemeinsames Kabel, aber verschiedene Messstecker im Keller erfasst werden. Im kommenden Winter sollen die Wiederholungsmessungen mit den Reserve-Masseleitungen durchgeführt werden, um die Ursache zu ermitteln.
Sollte dies nicht zu einer Veränderung der Messergebnisse führen, können Beschädigungen des Kabelbaums auf der Kerto-Platte bei der Montage die Ursache sein. Ob ein massiver Defekt der VIPs oder ein messtechnisches Problem vorliegt, kann ggf. bei der noch ausstehenden Thermografiemessung geklärt werden, da dann nicht einzelne VIPs sondern die komplette untere VIP-Reihe defekt wäre, die im Thermografie-Bild trotz Hinterlüftung möglicherweise erkennbar sein wird.

<u>Zusammenfassung: Alle Gebäude</u>
Abbildung 4.3-8 und Abbildung 4.3-9 zeigen Fassadenansichten der Häuser 35 und 37, auf die die defekten VIPs eingezeichnet wurden. Insgesamt sind fünf defekte VIPs zu verzeichnen. Es handelt sich zweimal um das rechte obere VIP von GEDT 2, zwei nebeneinander liegende VIPs am Prototypen 37/1, ein VIP der unteren Reihe links von Haus 35 und ein möglicherweise zusätzlich defektes VIP neben dem Fenster im GEDT 37/4, das hier nicht mitgezählt wurde (schräg schraffiert markiert). Bei Haus 39 sind keine VIPs defekt.

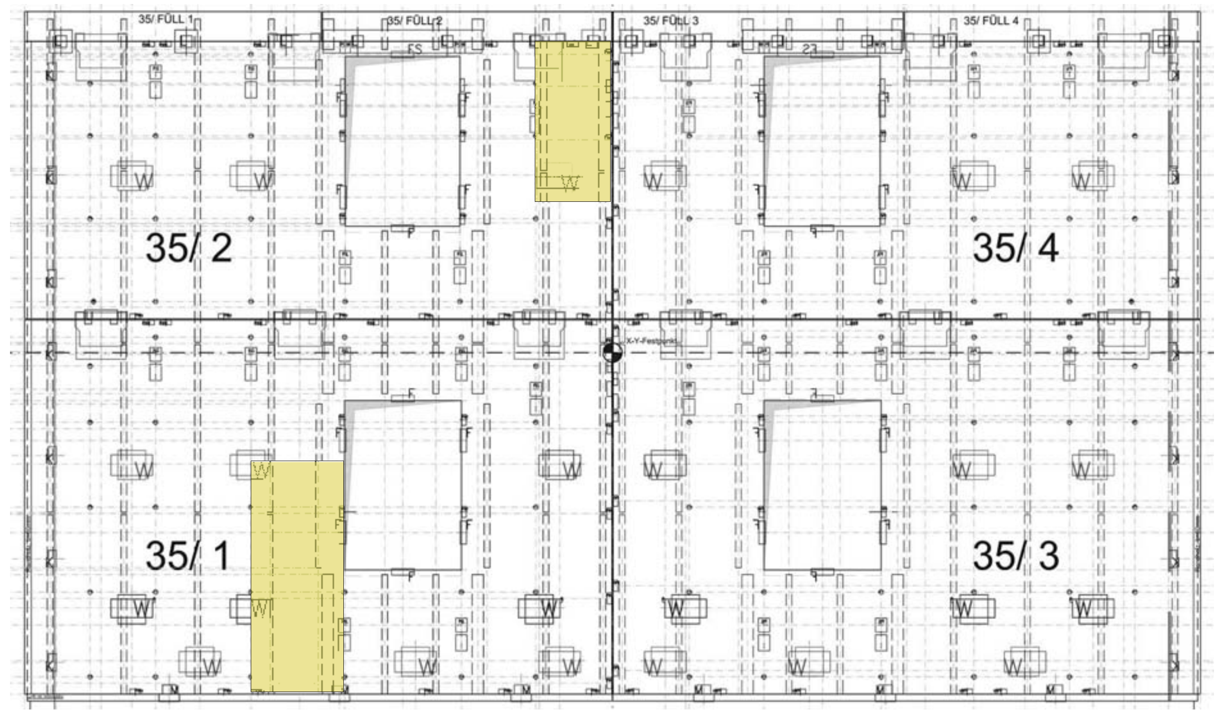


Abbildung 4.3-8: Lage der defekten VIPs beim ESH60

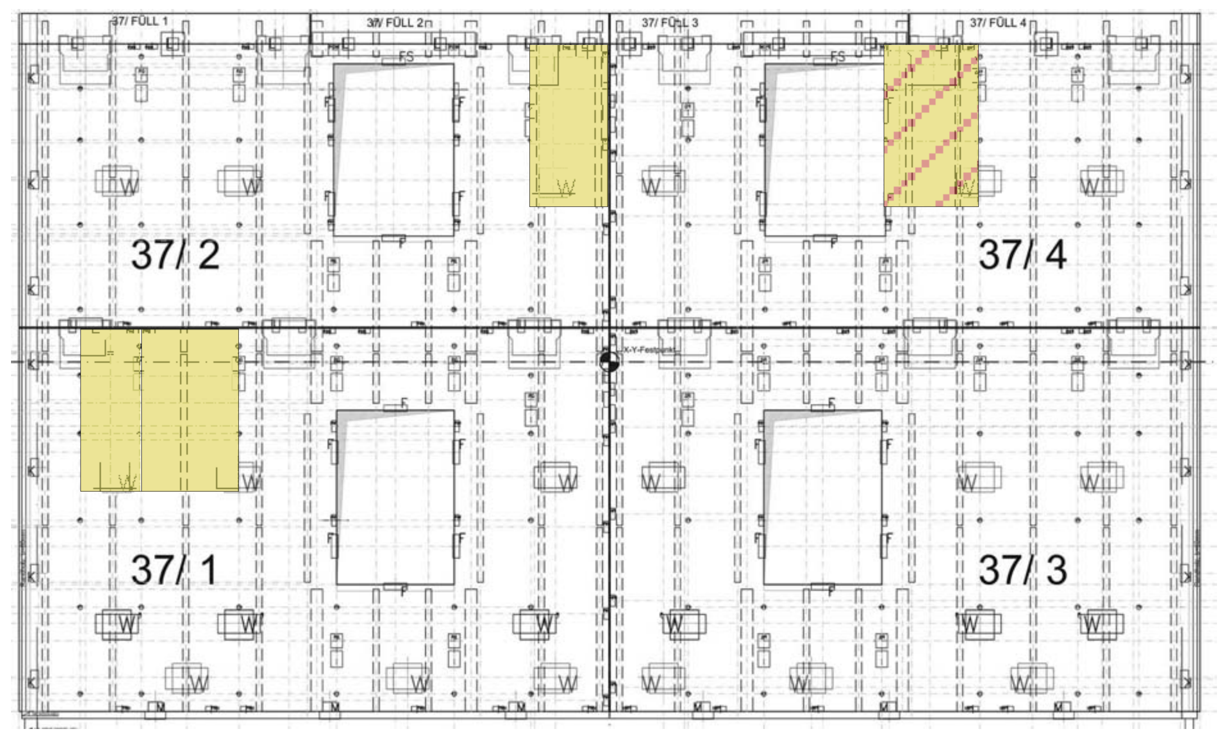


Abbildung 4.3-9: Lage der defekten VIPs beim EneV-Neubau-Gebäude

<u>Fazit</u>
Die Funktionskontrolle der Vakuumdämmpaneele ergab, dass insgesamt fünf Paneele (verteilt auf zwei Gebäude) einen Defekt aufweisen. Angesichts einer Zahl von 154 (messbaren) VIPs entspricht dies einer Versagensquote von rund 3 %. Über den Zeitpunkt der Beschädigung der entsprechenden VIPs können keine Aussagen getroffen werden. Bei einem GEDT mit Problemen bei der Messtechnik müssen Wiederholungsmessungen durchgeführt werden.

4.4 Kontinuierliche Überwachung der GEDT-Feuchte

<u>Beschreibung</u>
Zusätzlich zur Funktionskontrolle der VIPs wird an ausgewählten Punkten kontinuierlich die Temperatur und die Feuchte der Kertoplatte gemessen. Ziel dieser Messungen ist die energetische und feuchtetechnische Überprüfung von Wärmebrücken in der Konstruktion im Vergleich zum ungestörten Zustand hinter einem VIP. Dazu wurden in ein GEDT im ESH40 im Erdgeschoss rechts (GEDT 39/3) sechs Miniatur Feuchte-/Temperaturfühler TRF 10tiny der Firma Krah&Grote eingebaut. Diese Fühler im zylindrischen Gehäuse haben nur einen Durchmesser von 6,5 mm und ließen sich damit gut in die 27 mm dicke Kertoplatte einbauen. Das Messsignal wird digital an einen Messwandler im Innenraum übertragen, so dass keine Messfehler durch Leitungslängen auftreten. Die Messwandler MwwDA-010 der gleichen Firma übertragen den digitalen Messwert in eine 0 – 10 V Spannung, die dann mit dem Messsystem im Haus erfasst wird. Die Fühler werden sekündlich abgefragt und die Messwerte als Stundenmittelwerte abgespeichert.

Kenndaten der Fühler und Messwandler:

Temperaturmessung

Messbereich	-40 bis +120	°C
Auflösung	0,01	°C
Genauigkeit (Bereich 0 – 40 °C)	± 0,5	°C
Reproduzierbarkeit	± 0,1	°C

Feuchtemessung

Messbereich	0 bis 100	% rel. F
Auflösung	0,03	% rel. F
Genauigkeit (Bereich 10 – 90 % rel. F)	± 2	% rel. F
Reproduzierbarkeit	± 0,1	% rel. F
Linearitätsfehler	< 1	% rel. F
Hysterese	± 1	% rel. F
Langzeitstabilität	< ± 0,3	% rel. F/Jahr

Der Fühler ist voll betaubar.

Messwandler Temperaturmessung

Messbereich	0 bis +100	°C
Auflösung	0,1	°C
Genauigkeit (vom Messwert des Sensors)	± 0,1	°C
Reproduzierbarkeit	± 0,1	°C

Messwandler Feuchtemessung

Messbereich	0 bis 100	% rel. F
Auflösung	0,1	% rel. F
Genauigkeit (vom Messwert des Sensors)	± 0,1	% rel. F
Reproduzierbarkeit	± 0,1	% rel. F

Folgende Punkte werden mit den Temperatur-/Feuchtefühlern kontinuierlich gemessen:

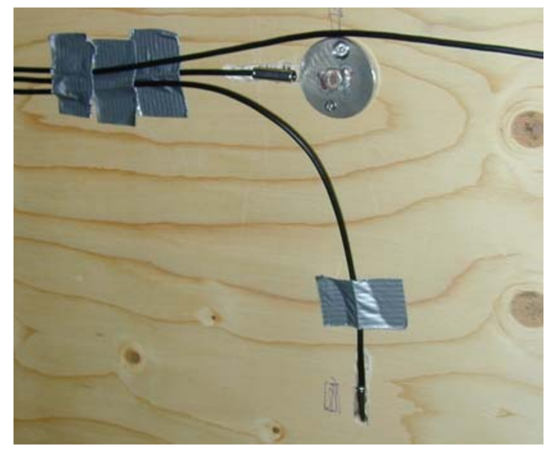
- In der Mitte des größten VIPs als ungestörter Referenzwert.
- Unter dem Fenster in der Fuge zwischen Fenster und Kertoplatte. Die Fuge wurde werkseitig mit Kompriband gefüllt und anschließend von außen (vor dem Abkleben) zusätzlich mit Ortschaum gefüllt.
  Dieser Fühler soll mögliche Feuchtebelastungen durch Schlagregen von außen bzw. unvollständige Abdichtung gegen Luftströmung von innen in der Fensterfuge erfassen.
- An einem PW-Anker (Schraube M6, die die Dämmebene senkrecht in einer VIP-VIP-Fuge durchdringt).
  Dient zur Überprüfung der Temperatur und Feuchteentwicklung an einer bedeutenden Wärmebrücke.
- VIP-VIP-Stoß auf der Innenseite der Kertoplatte.
  Hier soll überprüft werden, ob der VIP-Stoß einen nennenswerten Einfluss auf das Temperatur- und Feuchteverhalten hat.
- Vertikalfuge zu GEDT 39/1 etwa auf mittlerer Höhe des Elements.
  Die GE-GE-Fugen waren konstruktiv schwieriger zu lösen, da sie nicht von innen abgedichtet werden konnten und auch die Ausgleichsdämmung von ca. 4 cm in diesem Bereich nicht immer lückenlos anliegen wird. Der Schlagregenschutz wird über die Fassadenbekleidung sichergestellt. Zwar befindet sich die Stoßfuge der Fassadenplatten direkt über der GE-GE-Fuge, sie wird jedoch durch eine Aluschiene abgedeckt.
  Die Fuge, in der der entsprechende Messfühler montiert wurde, bereitete bei der

Montage in Hofheim Probleme, so dass sie vor Ort nachträglich mit PU-Montageschaum nachgedichtet wurde. Sie stellt wahrscheinlich die ungünstigste Ausführung aller drei Gebäude dar.

- Horizontalfuge zu GEDT 39/4, ca. 1 m neben der Gebäudemitte.
  Horizontalfugen sind gegen Schlagregen besonders empfindlich. Die Fuge wird durch die Fassadenverkleidung überdeckt, die Fugenbreite liegt bei ca. 10 mm und somit im Bereich der Planungswerte.

Montage

Zusammen mit den Temperaturfühlern für die VIP-Funktionskontrolle wurden bei der Vorfertigung die sechs Temperatur-Feuchte-Fühler montiert. Auf der Innenseite des Elements 39/3 (Haus 39, EG rechts) wurden Vertiefungen in die Kertoplatte eingefräst und die Fühler darin befestigt. Dabei wurde darauf geachtet, dass vor der Öffnung des Temperatur-/Feuchtefühlers ein Luftraum bleibt, in dem sich eine Ausgleichsfeuchte einstellen kann. Anschließend wurde der Fühler mit Montagekleber fixiert und mit Butyl-Klebeband abgeklebt. Ebenso wurden die beiden Fühler in den GEDT-Fugen in die Kertoplatte eingefräst. Die Anschlusskabel wurden nach innen auf das Fenster geführt und nach der Montage des Elements in Hofheim durch die Fensterleibung in einen Anschlusskasten in einem Wohnraum geführt.



Fühler für die Wärmebrücke Befestigungsanker (oben) und VIP-VIP-Stoß (unten)



Fühler in der vertikalen GE-GE-Fuge



Anschlusskabel aller Fühler vor Transport



Position der Fühler als Projektion auf Außenseite der Fassade

Abbildung 4.4-1: Montage der Temperatur-/Feuchtefühler und Lage der Fühler am Element

Die Abbildung 4.4-1 zeigt die Situation bei der Anbringung der Fühler sowie ihre Position als Projektion auf die Außenansicht der fast fertigen Fassade.

Liste der T/F-Fühler GEDT39/3

1. Unter Fenster in Fuge Fenster-Kertoplatte
2. Mitte VIP (ungestörter Bereich)
3. PW-Punkt (innen, ca. 3 cm von PW-Anker entfernt)
4. VIP-VIP-Stoß (auf der Innenseite Kertoplatte gemessen)
5. Vertikalfuge (zu GEDT 39/1 etwa mittlere Höhe)
6. Horizontalfuge (zu GEDT 39/4, ca. 1 m neben Gebäudemitte)

Messergebnisse

Im Zeitraum vom 30.10.2006 bis zum 20.06.2007 wurden die Messwerte der sechs Kombifühler ausgewertet. In der Zeit vom 15. bis 20. Dezember wurde die Perimeterdämmung an dem Gebäude montiert, erst danach war die Fassade energetisch fertig gestellt.

Temperaturen

Die folgende Abbildung 4.4-2 zeigt den gemessenen Temperaturverlauf an den sechs GEDT-Messstellen sowie die Außentemperatur im gesamten Zeitraum.

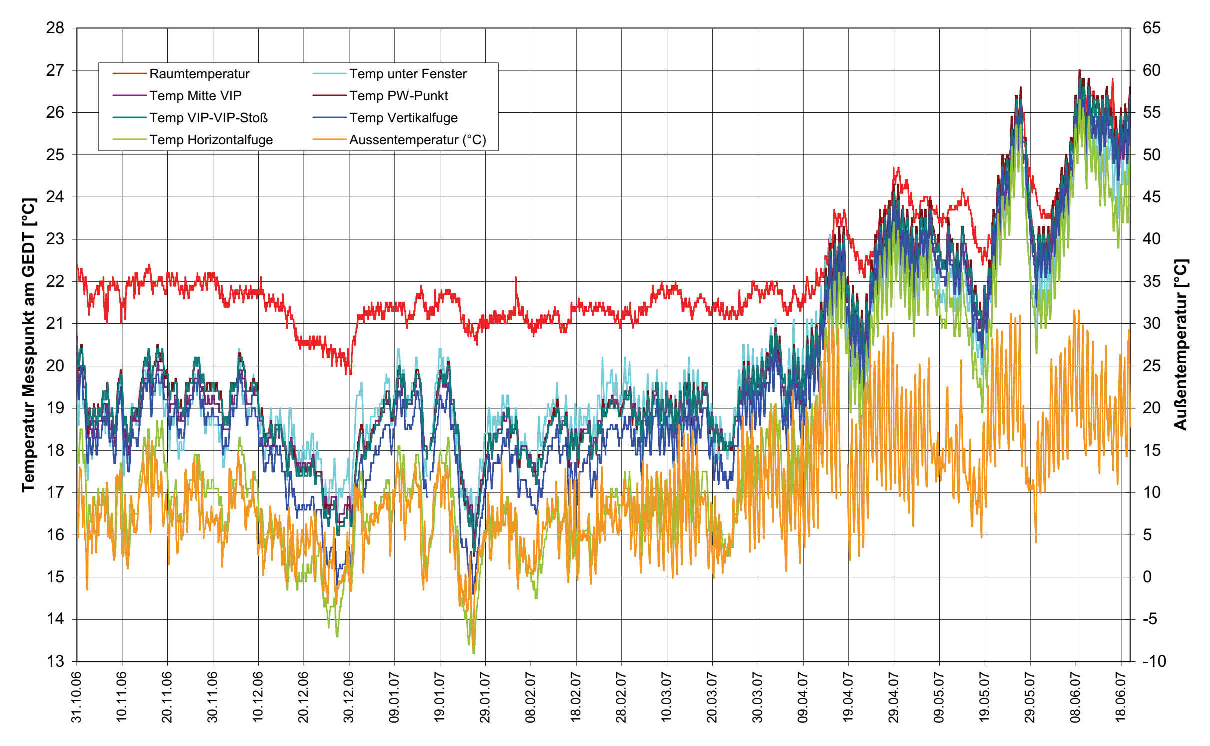


Abbildung 4.4-2: Temperaturverlauf der sechs kontinuierlich überwachten Messstellen und der Außentemperatur - Stundenwerte

Um die Auswertung zu vereinfachen, sind in den nächsten Diagrammen nur typische Ausschnitte der Messwerte gewählt, und bei den Temperaturen wurden auf Basis von Tagesmittelwerten die Differenzen zwischen der Temperatur an der Messstelle und der Raumtemperatur berechnet.

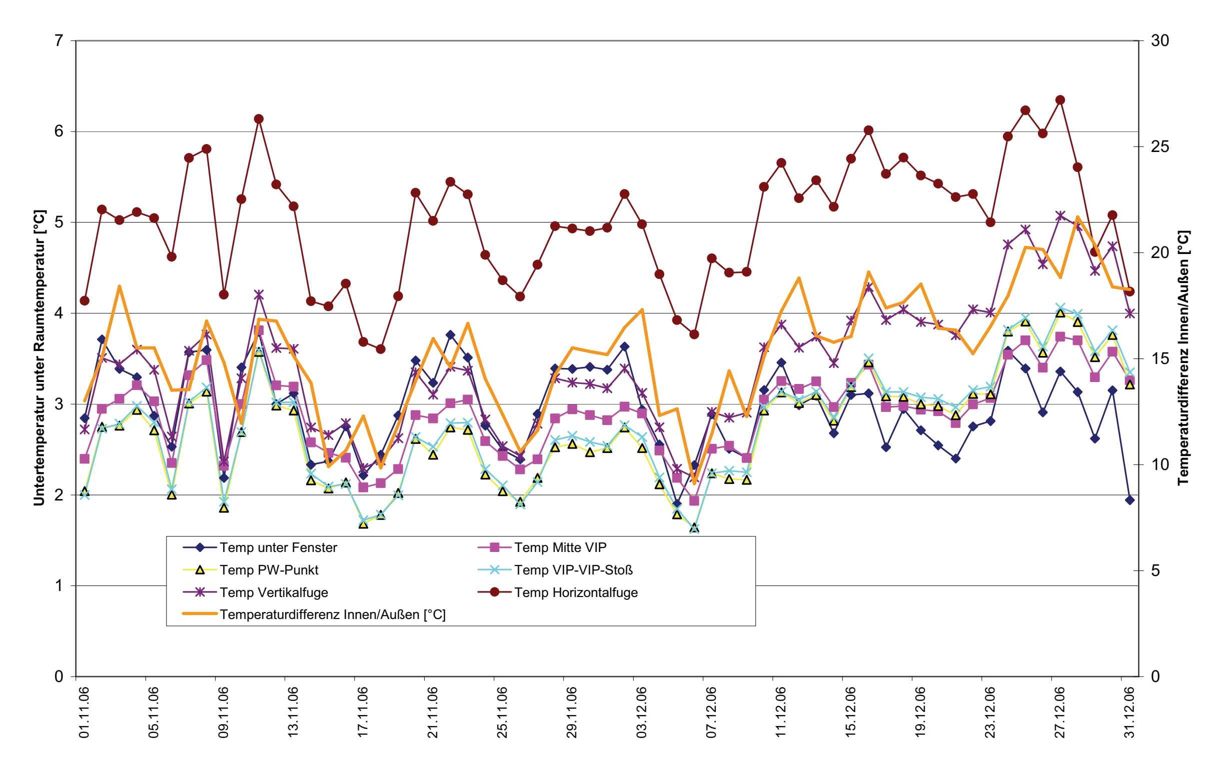


Abbildung 4.4-3: Tageswerte des Verlaufs der Untertemperatur (unter Raumtemperatur) der GEDT-Messstellen sowie Temperaturdifferenz innen/außen für die Monate November/Dezember 2006

In Abbildung 4.4-3 folgen die Messwerte der sechs GEDT-Messstellen, wie dies erwartet wurde, dem Verlauf der Temperaturdifferenz zwischen innen und außen. In der Abbildung ist als durchgezogene Linie ohne Markierung der Einzelwerte die Temperaturdifferenz zwischen innen und außen auf der rechten Y-Achse aufgetragen. Bei den Messwerten GEDT (linke Y-Achse) fällt auf, dass die drei Fühler „ungestörtes VIP“, „an PW-Anker“ und in „VIP-VIP-Fuge“ nahezu deckungsgleich verlaufen. Hier ist somit im Rahmen der Messunsicherheiten kein Einfluss der Wärmebrücken messbar.

Nach Anbringen der Perimeterdämmung Mitte Dezember sinkt die Untertemperatur des im ungestörten Bereich montierten Fühlers leicht ab (d. h. die lokale Temperatur steigt an), da dieser mit ca. 80 cm Abstand von der unteren Gebäudekante am stärksten davon beeinflusst wird. Die Messwerte des Fühlers in der Fensterfuge verlaufen in der Anfangszeit oberhalb der Kurven der im vorigen Absatz genannten drei Fühler mit fast identischen Messwerten, d. h. die Temperatur liegt niedriger (aufgetragen ist die Untertemperatur). Auch hier sinkt ab Mitte Dezember die Untertemperatur. Auch dieses Verhalten könnte mit der Anbringung der Perimeterdämmung zusammenhängen, da die Messstelle noch von der unteren Gebäudekante beeinflusst werden kann. Da gleichzeitig der Wärmeeintrag über die Fensterleibung und den davor befindlichen Heizkörper höher ist als bei den anderen Messstellen, wird die Temperaturanhebung noch verstärkt.

Der VIP-VIP-Stoß führt auf der Innenseite der Kertoplatte nur zu einer Temperaturabsenkung von 0,3 K gegenüber der ungestörten Messstelle. Dies ist nach Anbringung der Perimeterdämmung Mitte Dezember ungefähr zu erkennen. Der PW-Anker sollte zu einer Erniedrigung der Temperatur um ca. 0,8 K führen, was aber mit den Messergebnissen nicht belegt werden kann. Gründe können Inhomogenitäten in der Ausgleichsdämmung sein.

Deutlich unterscheiden sich die GEDT-Fugen vertikal und horizontal von den anderen Fühlern. Die Untertemperatur in der horizontalen GE-GE-Fuge liegt im Mittel 2 K über derjenigen der anderen Fühler. Die Dämmung der GE-GE-Fuge besteht aus Kompriband (Wärmeleitfähigkeit 0,055 W/(mK)) und kann nicht den gleichen U-Wert erbringen wie ein Vakuumpaneel. Eine 8 mm breite GE-GE-Fuge führt rechnerisch zu einer Absenkung der Temperatur in der Fuge von 0,2 K. Springen die Rand-VIPs jeweils 10 mm von der GEDT-Kante aus zurück – wovon auszugehen ist – sinkt die Temperatur 1 K unter den ungestörten Fall. Beträgt die Fugenbreite 20 mm, und unterstellt man, dass die Ausgleichsdämmung in diesem Bereich über ca. 40 mm unterbrochen ist, ergibt sich eine Temperaturreduktion von 1,7 K. Somit kann man an der Stelle des Messfühlers in der horizontalen GE-GE-Fuge auf eine schlechte Ausführung der Fuge schließen. Die parallel durchgeführten Funktionsmessungen der VIPs an diesem Haus haben keine Hinweise geliefert, dass VIPs im Bereich der horizontalen Fuge defekt wären.

Der Fühler in der vertikalen GE-GE-Fuge liegt mit seinen Untertemperaturen anfangs bei ca. + 0,5 °C über dem ungestörten Zustand. Im Verlauf des Dezembers steigt diese Übertemperatur aber im Vergleich zu den anderen Fühlern scheinbar an. Dieser scheinbare Anstieg ist aber in Relation zur Veränderung der Vergleichsstellen zu sehen. Aufgrund der Messergebnisse ist an der Stelle der vertikalen Fuge mit einer Fugenbreite von ca. 10 mm und einem Rücksprung der VIPs von 5 mm zu rechnen.

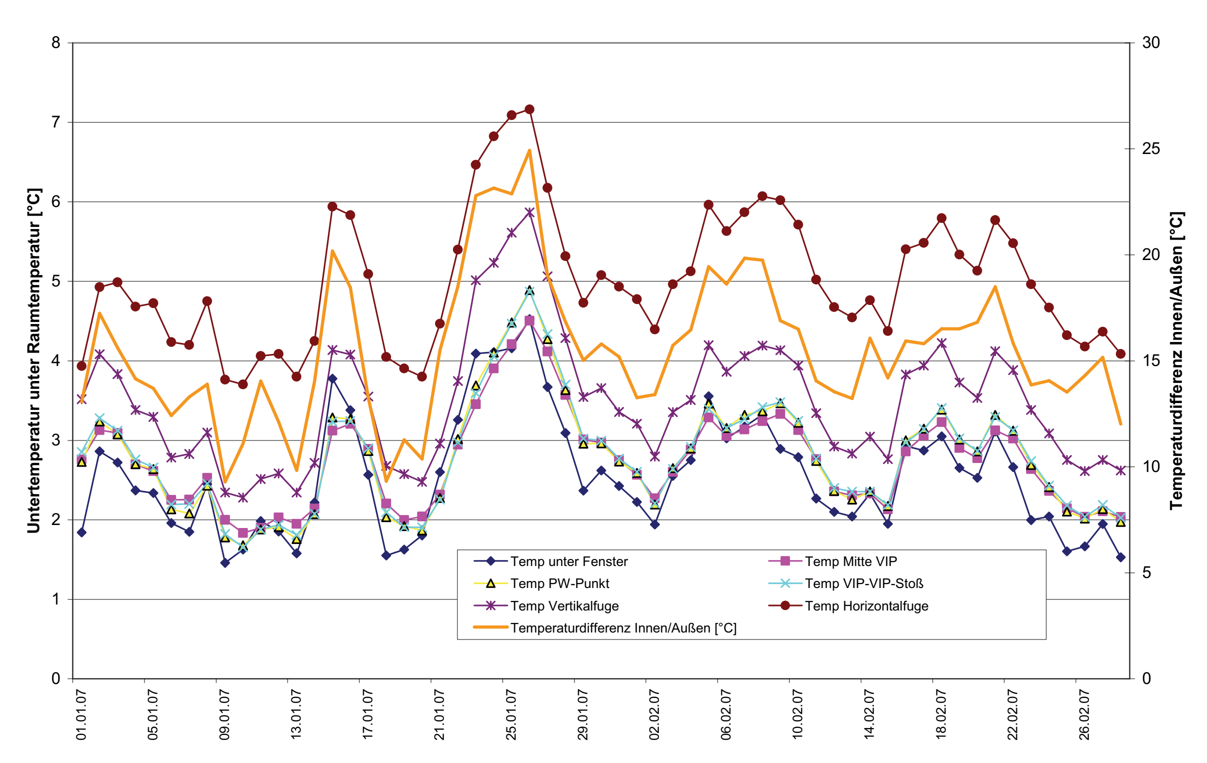


Abbildung 4.4-4: Tageswerte des Verlaufs der Untertemperatur (unter Raumtemperatur) der GEDT-Messstellen sowie Temperaturdifferenz innen/außen für die Monate Januar/Februar 2007

In dem vergleichsweise warmen Winter 2006/07 traten die niedrigsten Außentemperaturen Ende Januar auf. Abbildung 4.4-4 zeigt für die Monate Januar und Februar 2007 die Untertemperaturen der GEDT-Fühler gegenüber der Raumtemperatur. An den sehr kalten Tagen Ende Januar ist zu erkennen, dass die Messstellen an den Wärmebrücken tatsächlich etwas niedrigere Temperaturen aufweisen als das ungestörte VIP, die Auswirkungen sind

jedoch nicht besonders bedeutend. Anders wieder in den GEDT-Fugen, wo die Temperatur bis auf 14,9 °C bzw. 13,6 °C am 26.01.07 absinkt. Trotz dieser niedrigen Fugentemperaturen, bestand keine Tauwassergefahr (siehe nächster Abschnitt).

Der Vergleich zwischen den direkt nebeneinander angeordneten Temperaturfühlern 39/3.9 für die VIP-Funktionskontrolle und dem Temperatur-/Feuchte-Fühler 2 im ungestörten VIP ergab folgende Werte (Tabelle 4.4-1):

Tabelle 4.4-1: Vergleich des Fühlers zur Funktionskontrolle (PT100) und Temperaturkanal der Temperatur-/Feuchtefühlers

Messung	Fühler 39/3.9 (Einzelmessung)	T/F2 (Stundenmittelwert)
30.10.2006	20,6 °C (15:00)	20,5 °C (18:00)
12.12.2006 08:00	18,4 °C	18,3 °C
20.12.2006 08:00	17,7 °C	17,5 °C

Somit stimmen die Messergebnisse im Rahmen der Messunsicherheiten der verschiedenen Messfühler sehr gut überein.

Feuchteentwicklung

In Abbildung 4.4-5 ist die gemessene Ausgleichsfeuchte der GEDT-Messstellen über die Außentemperatur und die relative Außenluftfeuchte der Messstation Frankfurt Flughafen des Deutschen Wetterdienstes aufgetragen (eigene Außenluft-Feuchtemessungen wurden nicht vorgenommen, die Station Frankfurt liegt ca. 10 km von Hofheim entfernt). Während Außentemperatur und Außenluftfeuchte stark schwanken, sinkt die Ausgleichsfeuchte an den Messstellen in der Kertoplatte bis Mitte April kontinuierlich ab. Die GEDT wurden im Herbst 2006 bei vergleichsweise feuchtem Wetter montiert, so dass hier im Laufe des Winters ein Abtrocknen des Holzes festzustellen ist. Die Luft-Ausgleichsfeuchten lagen zu Beginn der Messungen zwischen 57 und 65 % rel. Feuchte und sanken im Verlauf des Winters auf 47 bis 54 % rel. Feuchte ab. Einzelne Ausreißer nach unten, die in dieser Darstellung nicht korrigiert wurden, entstanden durch Fehler in der Mess- und Auswerteelektronik.
Es ist somit keine Auffeuchtung im Holz zu beobachten, sondern es tritt sogar eine Abtrocknung auf. Ab Anfang Mai ist ein leichter Anstieg der Ausgleichsfeuchte im Kerto festzustellen. Dieser Verlauf ist direkt mit dem im Sommer üblichen Anstieg der relativen Außenluftfeuchte korreliert. Daher ist zu erwarten, dass die Feuchtewerte zum Winter hin wieder abnehmen werden.
Da es sich hier um Langzeitvorgänge handelt, können genauere Aussagen, besonders auch bezüglich des Verhaltens im Sommer, erst im weiteren Verlauf der Messphase getroffen werden.

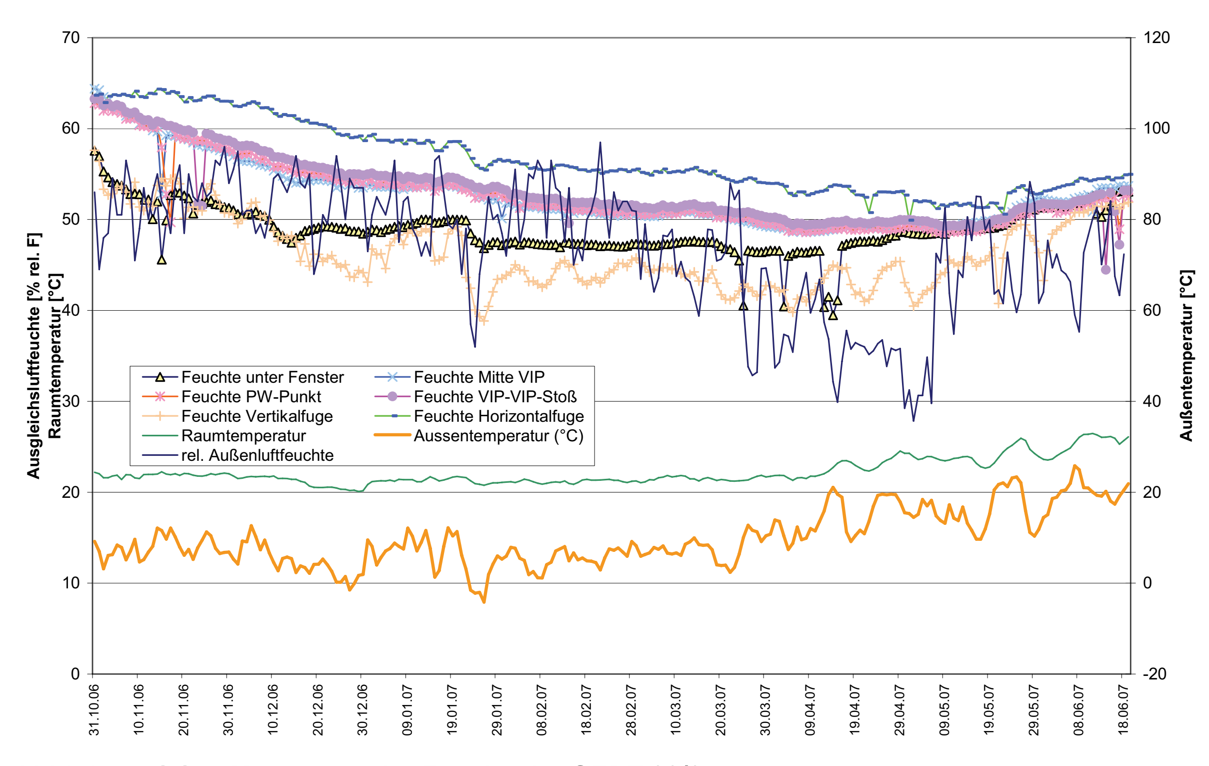


Abbildung 4.4-5: Messwerte der Feuchte im GEDT 39/3

Unterschiede zwischen den einzelnen Kurven sind an den Messstellen zu erkennen, die nur über ein Kompriband von der Außenluft getrennt sind (Fühler „Fensterfuge“, vertikale GEDT-Fuge“ und „horizontale GEDT-Fuge“). Die horizontale GEDT-Fuge liegt in ihren Werten ca. 5 % über Messstellen in der GEDT-Fläche, was gut durch die geringere Temperatur zu erklären ist. Ein deutlicher Einfluss des kurzzeitigen Außenklimas ist nicht erkennbar, so dass von einem dichten Abschluss nach außen ausgegangen werden kann. Die Ausgleichsfeuchte in der Fensterfuge verläuft anfangs deutlich unter derjenigen der übrigen Fühler. Ab Mitte Dezember (Montage der Perimeterdämmung) verkleinert sich der Abstand zu den ungestörten Messstellen, und Schwankungen des Außenklimas sind kaum noch an den Messwerten zu erkennen. Auch hier muss die langfristige Entwicklung für eine endgültige Bewertung abgewartet werden. Schließlich fällt die vertikale GEDT-Fuge auf, deren Ausgleichsfeuchte deutlich durch das Außenklima beeinflusst wird. Mögliche Ursachen könnten Undichtigkeiten gegen Außenluft oder – dies ist wahrscheinlicher – der Einfluss des in der Nähe des Fühlers liegenden seitlichen Ankers sein. Genauere Aufschlüsse müssen auch hier die weiteren Messungen erbringen. Diese werden 2008 in einem separaten Endbericht über das gesamte Forschungsvorhaben dokumentiert.

Unabhängig von den Einzelbetrachtungen ist grundsätzlich festzustellen, dass trotz teilweise niedriger Außentemperaturen bisher eine Auffeuchtung weder an den Fugen noch an den Wärmebrücken zu erkennen ist.

<u>Fazit</u>

Die kontinuierliche Messung der Temperaturen und Ausgleichsfeuchten an einem GEDT-Element zeigte keine Auffeuchtungserscheinungen. Die Fugen zwischen den Großelementen wiesen an den Messstellen etwas schlechtere Ergebnisse (höhere Temperaturen) auf, als nach der Planung zu erwarten war.

5 Schallmessung

5.1 Einführung

Zweck der Untersuchungen war es zu prüfen, ob die besondere Bauweise der Fassadenfront (GEDT mit Vakuumdämmung) im Hinblick auf die Schalldämmung Defizite oder Vorteile ergibt.

Im Hinblick auf die Schalldämmung waren zwei Aspekte zu berücksichtigen:
- Schallschutz gegen Außenlärm,
- Schallschutz im Inneren des Gebäudes zwischen zwei Wohneinheiten unter Berücksichtigung einer Flankenschallübertragung über die Fassadenfront.

Die Prüfungen sollten nicht als Gütenachweis im Sinne der DIN 4109 herangezogen werden.

Zur Untersuchung der Schalldämmung gegen Außenlärm wurden Messungen der Luftschalldämmung der Fensterelemente an der Straßenfront durchgeführt. Da für die Fenster keine Vergleichsmessungen im Laborprüfstand oder in der Einbausituation vor der Renovierung existieren, wurde zur Beurteilung der Fenster die zu erwartende Schalldämmung entsprechend der konstruktiven Details nach Tabelle 40 aus Beiblatt 1/A1 DIN 4109:2003-09 ermittelt. Auf Grundlage eines Vergleichs zwischen den gemessenen Werten und den Erwartungswerten wurde die schalltechnische Eignung der Fassadenkonstruktion beurteilt. Da bei der Fensterkonstruktion mehr Wert auf eine gute Wärmedämmung als auf eine gute Schalldämmung gelegt wurde, sind in der Konstruktion Scheiben eingesetzt worden, die keinen erhöhten Schalldämmanforderungen genügen. Daher ist die Aussagekraft der durchgeführten Messungen auf Fenster mit einer eher durchschnittlichen Schalldämmung beschränkt.

Zur Beurteilung der Flankenübertragung durch das Fassadensystem mit Vakuumdämmpaneel wurden Messungen des Bau-Schalldämm-Maßes der Wohnungstrenndecken durchgeführt. Da bei der Bestimmung des Bau-Schalldämm-Maßes auch die Schallübertragungen über flankierende Bauteile mit gemessen wird, können hierdurch Aussagen über einen Einfluss der Fassadensysteme gewonnen werden. Da eine Messung der Schalldämmung vor der Sanierung des Objekts nicht durchgeführt wurde, musste für die Beurteilung der Situation eine Vergleichsmessung in benachbarten Räumen durchgeführt werden. Die baulichen Gegebenheiten in den beiden Räumen waren im Wesentlichen gleich, mit einer Ausnahme: bei den zur Straßenseite orientierten Räumen war die straßenseitige Außenwand mit einem Fassadensystem mit Vakuumdämmpaneel saniert worden, während bei den zur Gartenseite orientierten Räume alle Außenwände mit einem üblichen, kommerziellen WDVS ausgeführt wurden.

Die Schalldämmprüfungen wurden nach den aktuellen Normen und Regelwerken für Messungen in Gebäuden durchgeführt. Die Messungen selbst wurden am 12. Februar 2007 in den Häusern Wilhelmstraße 35 und 37 durch das ift Schallschutzzentrum (Bearbeiter: Dr. Joachim Hessinger und Bernhard von Houwald) durchgeführt.

5.2 Durchführung der Schallmessung

Die Prüfsituation für die Luftschallmessung des Fensterelements ist in Abbildung 5.2-1 zu ersehen. Die Messrichtungen bei der Prüfung der Luftschalldämmung der Decke wurde für die beiden Raumsituation in die Außenansicht des Gebäudes exemplarisch eingezeichnet, siehe Abbildung 5.2-2 für die Messung im Raum zur Straßenseite (Fassade mit Vakuumdämmpaneel) und Abbildung 5.2-3 für die Messungen im Raum zur Gartenseite (Außenwand mit WDVS). Die Zuordnung der einzelnen Messungen im Haus Wilhelmstraße 35 zu den jeweiligen Räumen kann auch den Grundrisszeichnungen in Abbildung 5.2-4 und Abbildung 5.2-5 entnommen werden.

Tabelle 5.2-1 Prüfnormen Schalldämmprüfung

Schalldämmprüfung	Prüfnorm
Messung der Luftschalldämmung zwischen Räumen in Gebäuden	DIN EN ISO 140-4
Messung der Luftschalldämmung von Fassadenelementen und Fassaden in Gebäuden	DIN EN ISO 140-5
Bewertung der Luftschalldämmung	DIN EN ISO 717-1

Als Schallquellen wurden eingesetzt:

- Luftschalldämmung Decke: Dodekaederlautsprecher
- Luftschalldämmung Fenster: gerichteter Monolautsprecher



Abbildung 5.2-1: Messung der Luftschalldämmung Fensterelement, Prüfelement rot umrandet

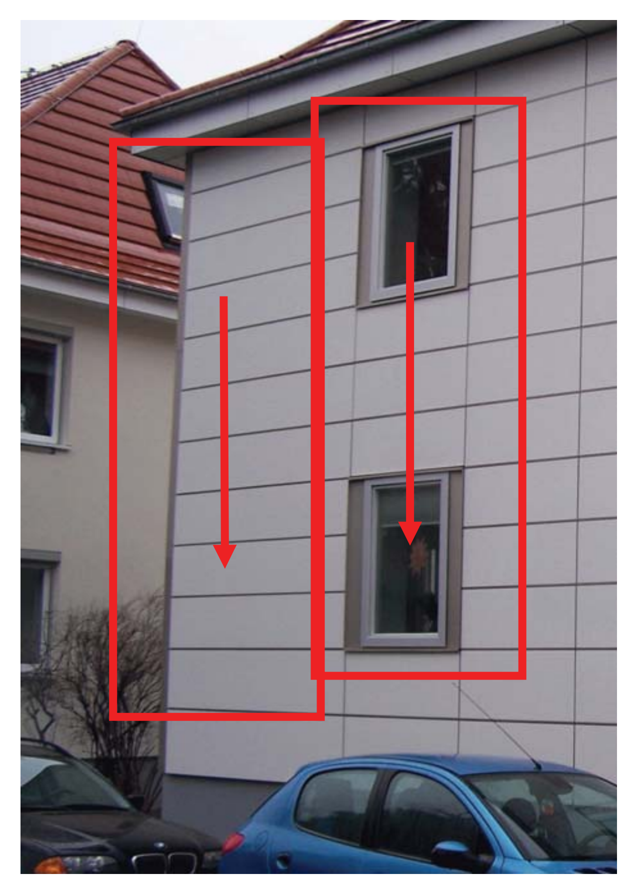


Abbildung 5.2-2: Messrichtung, Luftschalldämmung Decke im Raum zur Straßenseite

Abbildung 5.2-3: Messrichtung, Luftschalldämmung Decke im Raum zur Gartenseite

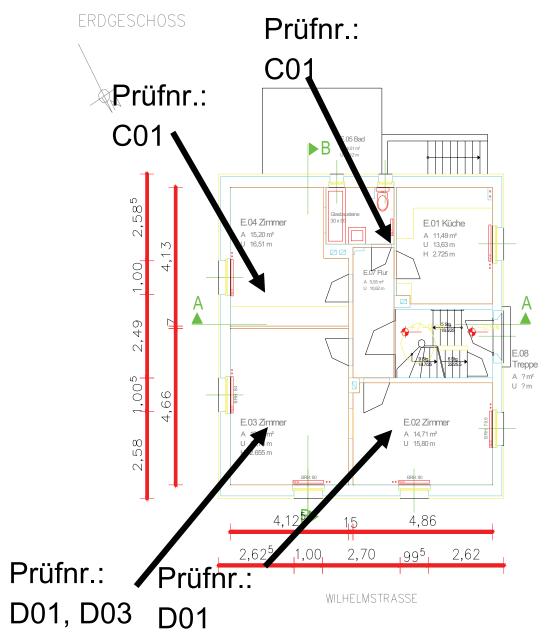


Abbildung 5.2-4: Grundrisszeichnung Haus Nr. 35, Erdgeschoss, mit Zuordnung der Prüfnummern zu den Räumen

Abbildung 5.2-5: Grundrisszeichnung Haus Nr. 35, 1. OG, mit Zuordnung der Prüfnummern zu den Räumen

5.3 Ergebnisse der Messungen

5.3.1 Messwerte

Eine Übersicht der durchgeführten Messungen ist der nachfolgenden Tabelle 5.3-1 zu entnehmen. Weitere Details der Messungen sind den Kurvenblättern im Anhang IV zu entnehmen.

Tabelle 5.3-1 Ergebnisübersicht

Messblatt Nr.	Prüfnr.	Messrichtung	Messung	Messergebnis in dB
1	A01	Wilhelmstr. 37, von Wohnzimmer EG nach Wohnzimmer OG (Straßenseite)	Luftschalldämmung Decke	R'_{w} (C;C_{tr}) = 53 (-1;-5) dB
2	A03	Wilhelmstr. 37, von außen nach Wohnzimmer EG (Straßenseite)	Luftschalldämmung Fenster	$R'_{45°,w}$ (C;C_{tr}) = 33 (-2;-5) dB
3	B01	Wilhelmstr. 37, von Wohnzimmer OG nach Wohnzimmer EG (Gartenseite)	Luftschalldämmung Decke	R'_{w} (C;C_{tr}) = 53 (-1;-5) dB
4	C01	Wilhelmstr. 35, von Wohnzimmer OG nach Wohnzimmer EG (Gartenseite)	Luftschalldämmung Decke	R'_{w} (C;C_{tr}) = 54 (-2;-6) dB
5	D01	Wilhelmstr. 35, von Kinderzimmer OG nach Schlafzimmer EG (Straßenseite)	Luftschalldämmung Decke	R'_{w} (C;C_{tr}) = 54 (-1;-6) dB
6	D03	Wilhelmstr. 35, von außen nach Schlafzimmer EG (Straßenseite)	Luftschalldämmung Fenster	$R'_{45°,w}$ (C;C_{tr}) = 33 (-1;-5) dB

5.3.2 Vergleiche

Zur Beurteilung der Ergebnisse müssen die Einzelergebnisse nicht nur hinsichtlich ihrer Einzahlangabe sondern auch hinsichtlich des spektralen Verhaltens untersucht und verglichen werden. Hierzu sind in Abbildung 5.3-1 und Abbildung 5.3-2 die Messergebnisse für die Luftschalldämmung der Decken getrennt für die Häuser Nr. 35 und 37 aufgetragen worden. In beiden Häusern zeigt sich jeweils ein ähnliches Bild, die gemessenen Kurven sind über einen Großteil des Frequenzbereichs deckungsgleich.

Für die Messung der Luftschalldämmung gegen Außenlärm der Fensterelemente ist der entsprechende Vergleich in Abbildung 5.3-3 dargestellt. Die Schalldämmkurven beider Fensterelemente sind über den gesamten Frequenzbereich praktisch deckungsgleich.

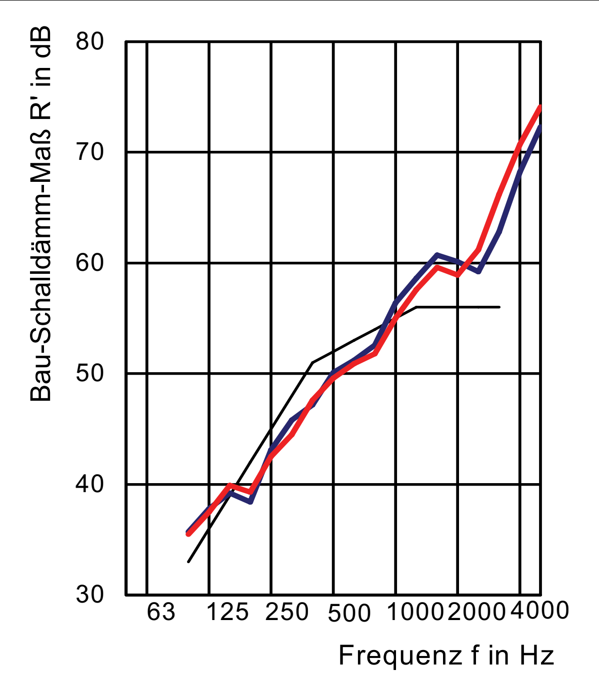


Abbildung 5.3-1: Schalldämmprüfung Haus Nr. 37, blaue Kurve: Messung Nr. A01, Decke in Räumen zur Straßenseite rote Kurve: Messung Nr. B01, Decke in Räumen zur Gartenseite

Abbildung 5.3-2: Schalldämmprüfung Haus Nr. 35, blaue Kurve: Messung Nr. D01, Decke in Räumen zur Straßenseite rote Kurve: Messung Nr. C01, Decke in Räumen zur Gartenseite

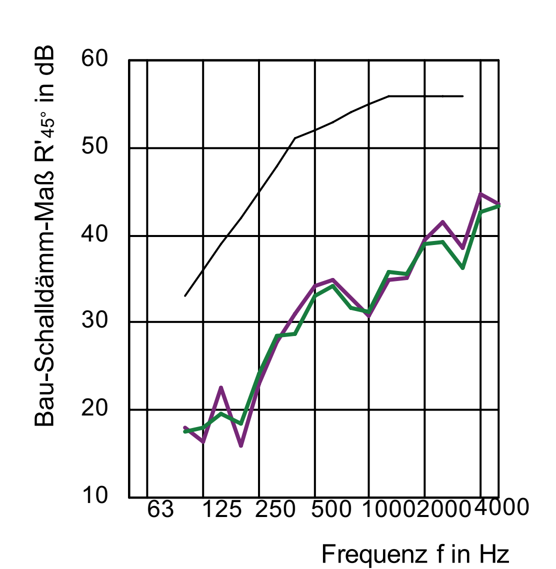


Abbildung 5.3-3: Messung der Luftschalldämmung der Fenster zur Straßenseite, Vergleich der Messungen in beiden Häusern violette Kurve: Messung Nr. A03, Fenster in Haus Nr. 37 grüne Kurve: Messung Nr. D03, Fenster in Haus Nr. 35

5.4 Beurteilung

5.4.1 Beschreibung der Bausubstanz

Die Bausubstanz in den beschriebenen Objekten ist im Hinblick auf die schalltechnischen Eigenschaften nur unvollständig dokumentiert. Zu der vorliegenden Altbausubstanz gibt es Angaben in dem Zwischenbericht der PlanungsgruppeDREI [PDrei 2006], die hier im Folgenden kurz zusammengefasst und mit den Untersuchungen bei dem beschriebenen Ortstermin abgeglichen werden.

Deckenkonstruktion: Für die Planung des Dachausbaus wurde eine Decke zwischen Dachgeschoss und erstem Obergeschoss geöffnet und untersucht [PDrei 2006], siehe Abbildung 5.4-1. Hierbei wurde folgender Aufbau (von oben nach unten) festgestellt:

- Dielenboden
- Balkenlage mit Einschub und Beschwerung mit einem Stroh-Kies-Lehm-Gemisch
- Lattung
- Rabbitzgewebe mit Stroh-Lehm-Putz

Für die weitere Analyse ist davon auszugehen, dass diese Deckenkonstruktion auch in den anderen Häusern und Geschossen eingesetzt wurde. Auf dieser Rohdecke waren in den einzelnen Häusern z. T. unterschiedliche Fußböden vorhanden. Im Haus Nr. 37 wurden im 1. Obergeschoss die vorhandenen Dielen der Rohdecke als Gehbelag hergerichtet. In Haus Nr. 35 im 1. Obergeschoss war auf diesen Dielen noch ein Laminatboden verlegt worden. Genauere Details über diese Böden, z. B. über trittschallentkoppelnde Zwischenschichten liegen nicht vor.



Abbildung 5.4-1: Holzbalkendecke im Objekt Wilhelmstraße 39, Quelle Bild: IWU

Außenwandkonstruktion:
Im Rahmen der Bauwerksanalyse wurde auch die Außenwand untersucht [PDrei 2006]. Hierbei wurde festgestellt, dass die Wand als zweischalige Ziegelwand mit einem Aufbau von ca. 11,5 cm Vollziegel – ca. 17 cm Luft – ca. 11,5 cm Vollziegel erstellt wurde. Die beiden Schalen dieses Mauerwerks sind durch ca. 30 cm lange Bindersteine (ca. 4 - 5 Bindersteine pro m²) miteinander gekoppelt. Die wärmetechnische Sanierung der Außenwand erfolgte auf der Straßenseite über ein Fassadenelement aus

Vakuumdämmpaneelen bzw. an den restlichen Fronten über ein WDVS (Dicke ca. 60 mm plus Putz, genauere Daten liegen nicht vor).

Innenwandkonstruktion:
Die Innenwände waren als Fachwerkwand mit Ziegelausmauerung ausgeführt.

Fensterelemente:
Die hier untersuchten Fensterelemente waren bei der Sanierung neu eingesetzt worden. Die konstruktiven Details, welche die Schalldämmung der Fenster bestimmen, sind nachfolgend in Tabelle 5.4-1 aufgelistet:

Tabelle 5.4-1 Beschreibung der Fensterelemente

Abmessungen	Gesamt (b × h) ca. 945 mm × 1400 mm Flügel (b × h) ca. 935 mm × 1385 mm
Profile	Material Holz-Aluminium mit Hartschaumdämmstoffkern Profilquerschnitt: Flügel 90/130
Beschlag	Dreh-Kipp-Beschlag mit Ecklager und Winkel-Scherenlager, je 2 Verriegelungspunkte bandseitig, schließseitig und oben, 1 Verriegelungspunkt unten
Falzdichtungen	Je 1 Dichtungsebene mittig und raumseitig im Flügelrahmen
Verglasung	Mehrscheibenisolierglas mit Aufbau: 4 mm Float - ca. 14 mm SZR – 4 mm Float - ca. 14 mm SZR – 4 mm Float
Sonstiges	Rollladenkasten oberhalb des Fensterelements, Aufbau unbekannt, Prüfung im Zustand Rollpanzer oben

5.4.2 Schalldämmung der Deckenkonstruktion

Zur Beurteilung der Flankenübertragung über das zu untersuchende Fassadensystem ist es bei einer Messung im ausgeführten Bau wichtig, die Eigenschaften des Trennbauteils, in diesem Fall der Trenndecke, so gut wie möglich zu kennen. Für die vorliegende Konstruktion ist die Luftschalldämmung der Deckenkonstruktion alleine jedoch unbekannt. Es ist zu erwarten, dass die Luftschalldämmung der Deckenkonstruktionen durch die flankierenden Wände (hier vorliegende Bausubstanz als zweischalige Ziegelwand) stark beeinflusst wird. Eine genaue Prognose ist für diese Sonderkonstruktion nicht möglich, da solche Bauweisen durch die technischen Regelwerke wie z. B. DIN 4109 [DIN 4109] nicht vollständig abgedeckt werden. Die gemessenen Bau-Schalldämm-Maße $R'w$ = 53 dB, bzw. 54 dB liegen jedoch in dem Bereich, der für die Luftschalldämmung einer Holzdecke in einem Massivbau zu erwarten ist [Gösele 1993].

5.4.3 Beurteilung der Flankenübertragung

Vorbemerkung:
Bei der Messung der Flankenschalldämmung von flankierenden Bauteilen ist sicherzustellen, dass die Schallübertragung nur über das flankierende Bauteil erfolgt. Um das zu gewährleisten, muss die Schalldämmung des Trennbauteils ausreichend hoch sein, bzw.

man kann grob sagen, dass die maximal messbare Flankenschalldämmung durch die Schalldämmung des Trennbauteils begrenzt wird. Daher ist die Aussagekraft von Messungen der Flankenschalldämmung im ausgeführten Bau begrenzt, wenn man nicht zusätzliche Ertüchtigungsmaßnahmen am Baukörper (großflächiges Abdecken von Trennbauteil oder flankierendem Bauteil mit biegeweichen Vorsatzschalen) vornimmt oder Messungen mit Körperschallaufnehmern durchführt. Beides war aus unterschiedlichen Gründen in dem untersuchten Objekt nicht möglich, weshalb Vergleichsmessungen der Luftschalldämmung in benachbarten Räumen durchgeführt wurden.

Analyse:
Es wurden Messungen der Luftschalldämmung der Decke in zwei nebeneinander liegenden Räumen durchgeführt. Damit ist zu erwarten, dass der Deckenaufbau und der Aufbau von Innen- und Außenwänden in beiden Fällen identisch ist. Der einzige Unterschied ist in der Ausführung der Außenverkleidung der Außenwände zu sehen:

- Räume zur Straßenseite: Außenwand mit Vakuumdämmpaneel (Straßenseite) und WDVS (Gartenseite)
- Räume zur Gartenseite: Außenwand immer mit WDVS.

Diese Vergleiche wurden sowohl in den Häusern Wilhelmstraße 35 und 37 durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abbildung 5.3-1 und Abbildung 5.3-2 dargestellt. Es zeigt sich, dass für die Frequenzen zwischen 100 Hz und 1600 Hz die gemessenen Schalldämmkurven in beiden Situationen praktisch identisch sind. Auch die Einzahlangaben des R'w sind jeweils identisch. Das jeweils höher bewertete Bau-Schalldämm-Maß, das im Haus Nr. 35 gemessen wurde, ist sehr wahrscheinlich auf den zusätzlich eingebrachten Laminatboden zurückzuführen. Oberhalb von 2000 Hz gibt es jeweils Unterschiede in den Messkurven, die jedoch nicht in die Bewertung des R'w einfließen. Ob diese Abweichungen auf die unterschiedliche Art der Fassadenverkleidung zurückzuführen ist, konnte nicht geklärt werden.

Unabhängig von diesem offenen Punkt kann festgestellt werden, dass die Luftschalldämmung in den beiden benachbarten Räumen jeweils im Wesentlichen identisch ist und dass im Rahmen der örtlich vorgegebenen Randbedingungen (Schalldämm-Niveau der Trenndecke ohne Nebenwege bis Rw = ca. 54 dB) keine Verschlechterung des bewerteten Schalldämm-Maßes des Trennbauteils durch die Ausführung der Außenverkleidung als GEDT-Elemente mit Vakuumdämmung im Vergleich zu einer üblichen, kommerziellen Ausführung als WDVS zu erwarten ist.

5.4.4 Beurteilung der Schalldämmung der Fenster

Fenster und deren Anschlüsse stellen im Altbau üblicherweise einen entscheidenden Schwachpunkt dar, wenn die Schalldämmung der Außenwand gegenüber Geräuschen außerhalb des Gebäudes betrachtet wird. Beim dichten Einbau neuer Fenster wird die Schalldämmung meist erheblich verbessert. Bei der Sanierung in Hofheim stellt sich die spezielle Frage, ob durch die besondere Einbausituation der Fenster in den GEDT-Elementen möglicherweise die dann üblichen Schalldämmeigenschaften dadurch nicht erreicht werden können.

Da weder für die Schalldämmung der Fensterelemente selbst noch für die Schalldämmung der Verglasung Prüfberichte vorliegen, wurde die zu erwartende Schalldämmung entsprechend der Fenstertabelle 40 aus Beiblatt 1 zur DIN 4109/A1 : 2003-09 abgeschätzt. Für die Schalldämmung der Isolierverglasung wurde nach Angaben von Isolierglasherstellern sowie nach dem Archiv des ift Schallschutzzentrums ein Wert von $R_{w,P,Glas}$ = 30 dB – 33 dB ermittelt. Damit ergibt sich ein bewertetes Schalldämm-Maß des Fensterelements (als Rechenwert) von $R_{w,R}$ = 31 dB – 34 dB.
In beiden Fällen wurde ein bewertetes Schalldämm-Maß von $R'_{45°,w}$ = 33 dB gemessen (siehe auch Abbildung 5.3-3). Dieses Ergebnis entspricht den Erwartungen nach der Fenstertabelle. Daher wird für einfache niederschalldämmende Fensterelemente ($R'_w \leq$ ca.33 dB) durch die besondere Einbausituation in Kombination mit einer vorgehängten Fassade aus Vakuumdämmpaneelen keine Verschlechterung der Schalldämmung der Fensterelemente zu erwarten sein.

6 Kosten

Da es sich bei den Großelementen mit Vakuumdämmung und eine komplette Neuentwicklung handelt, sind zum jetzigen Zeitpunkt kaum verbindliche Kostenaussagen im Bezug auf höhere Stückzahlen bzw. eine mögliche Markteinführung zu treffen. Insbesondere die Weiterentwicklungsmöglichkeiten (vgl. dazu auch Kap. 8) werden eine entscheidende Rolle spielen, so dass auch in dieser Hinsicht Kostenaussagen nur schwer durchzuführen sind.

Trotz dieser Einschränkungen sollen die Kosten hier aber detailliert behandelt werden, um durch Beschreibung des Status Quo eine Ausgangsbasis für Optimierungen des GEDT-Konzepts zu schaffen. Dies erfolgt in zwei Schritten:

- Zunächst werden in Abschnitt 6.1 die Kosten der während des Forschungsprojekts in Hofheim realisierten Elemente dargestellt. Es handelt sich dabei um die von der Firma Variotec eingeplanten Kosten, die etwa zur Mitte des Projekts, als die Elementplanung schon sehr weit fortgeschritten war und Erfahrungen mit dem ersten Prototyp vorlagen, kalkuliert worden waren. Durch zeitlichen Mehraufwand und notwendige Nachkorrekturen lagen die Kosten am Ende noch einmal deutlich höher. Diese Mehrkosten werden hier – ebenso wie die gesamte Grundlagenentwicklung und wissenschaftliche Begleitung - nicht in den Elementkosten berücksichtigt.
- Als nächster Schritt wird in Kapitel 6.2 der Übergang zu einer Kleinserienfertigung diskutiert. Es wird eine Produktionsmenge von jährlich 1000 m² Fassadenfläche angenommen. Dies wäre sozusagen der erste, noch sehr kleine Schritt in Richtung auf eine Markteinführung (zum Vergleich: in Hofheim wurden bereits ca. 180 m² installiert). Die Kostenschätzungen wurden von den Projektpartnern Variotec und IGRT durchgeführt. Es wurde genau das in Hofheim installierte System angenommen, d. h. weitergehende Möglichkeiten zur Vereinfachung und Weiterentwicklung wurden hier noch nicht berücksichtigt (s. dazu Kap. 8).

Alle folgenden Kostenangaben beziehen sich auf die Nettokosten (ohne Mehrwertsteuer).

6.1 Kosten im Modellprojekt

Die folgende Tabelle 6.1-1 gibt eine Übersicht über die Kosten der GEDT-Fassaden im Modellprojekt.

Tabelle 6.1-1: Kosten der Großelemente mit Vakuumdämmung im Modellprojekt in Euro pro m² Fassadenfläche: Detailübersicht (ohne Entwicklungskosten/wissenschaftliche Begleitung und ohne unvorhergesehene Kosten durch zeitliche Verzögerungen/Nachkorrekturen)

Kosten GEDT - Projekt Hofheim		
Material		
VIP	188 €	
Metallteile	348 €	
Kerto	31 €	
BFU	11 €	
Resoplan (Fassade)	159 €	
Sonstiges	11 €	
Fenster (anteilig)	44 €	
Summe:	**Material**	**791 €**
Fertigung		
Personal Fertigung	108 €	
CNC-Programmierung	30 €	
Summe:	**Fertigung**	**139 €**
Transport und Montage		
Aufmaß	10 €	
Transport	11 €	
Transportvorrichtungen	27 €	
Montagetraverse	7 €	
Hebebühne/Gerüst	6 €	
Montagekran/-stapler	13 €	
Montagekosten	36 €	
Summe:	**Transport/Montage**	**110 €**
Planung		
Planung	150 €	
Summe:	**Planung**	**150 €**
	Gesamtkosten	**1.190 €**

Die Gesamtkosten belaufen sich auf 1190 Euro pro m² Fassadenfläche, wobei die Materialkosten mit ca. 790 €/m² den größten Anteil ausmachen. Hierbei dominiert nicht etwa, wie man vielleicht zunächst vermuten würde, die Vakuumdämmung. Vielmehr haben die geometrisch komplizierten und daher – insbesondere bei der erstmaligen Realisierung im Modellvorhaben – aufwändig zu produzierenden Metallteile den größten Kostenanteil.
Die Fensterkosten wurden anteilig auf die Gesamtfassade umgelegt (ca. 61,4 m² Fassadenfläche pro Gebäude). Für sich genommen betrugen die Kosten der Passivhausfenster mit Dreifachverglasung 442 €/m² (bezogen auf die Fensterfläche von ca. 6,1 m² pro Gebäude). Die Kosten des Großelements ohne Fenster betragen 1272 €/m² (bezogen auf die verbleibende Fassadenfläche von ca. 55,3 m²).
Die Planungskosten lassen sich im Modellvorhaben kaum verbindlich angeben. Schließlich handelt es sich hier um eine Erstentwicklung und erstmalige Realisierung. Bewusst wurden aber nicht die gesamten Entwicklungskosten angesetzt, sondern ein gerundeter Wert über den Planungsbeitrag von Variotec zum Zeitpunkt der Kostenschätzung.

Abbildung 6.1-1 zeigt noch einmal eine Übersicht über die wichtigsten Kostenfaktoren.

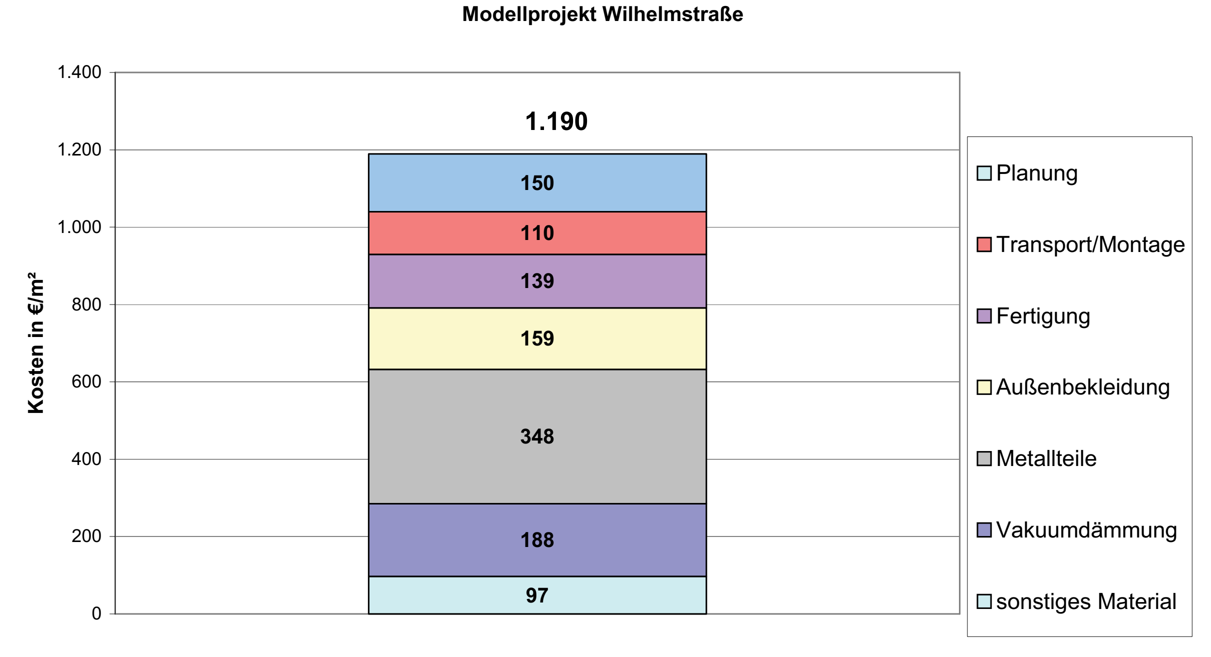


Abbildung 6.1-1: Kosten der GEDT-Fassadenelemente im Modellprojekt

Insgesamt gesehen erscheinen Kosten von fast 1200 €/m² natürlich deutlich zu hoch für eine breite Markteinführung, wenn man sie mit den Kosten üblicher Wärmeschutzmaßnahmen, z. B. einem Wärmedämmverbundsystem vergleicht, die in der Größenordnung von etwa 100 €/m² liegen.
Aus diesem Vergleich dürfen aber noch keine zu weit gehenden Schlussfolgerungen gezogen werden: Schließlich handelt es sich hier um eine Neuentwicklung, die erstmals erprobt wurde. Entscheidend sind die Kostensenkungen, die beim Übergang zu einer Serienfertigung und bei einer Weiterentwicklung des Konzepts zu erwarten wären. Auch wenn dabei die Kosten konventioneller Wärmedämmsysteme nicht erreicht würden, könnten gegebenenfalls dennoch Marktchancen in „Nischenanwendungen" bestehen, insbesondere dann, wenn ein hoher Einsatz von Vakuumdämmung eine Reduzierung der Dicke des Wärmeschutzsystems erforderlich macht.
Um im Rahmen der bestehenden Möglichkeiten Aussagen zu den Perspektiven für Kostensenkungen zu treffen, wird im Folgenden der Übergang zur Serienfertigung behandelt.

6.2 Kostenperspektive bei Übergang zur Kleinserienfertigung

Die folgende Tabelle 6.2-1 gibt Schätzungen der Projektpartner Variotec und IGRT zu den Kosten bei Übergang zur Kleinserienfertigung an (Herstellung von 1000 m² Fassadenfläche pro Jahr). In der nachfolgenden Abbildung 6.2-1 ist wiederum eine Übersicht über die wesentlichen Einflussfaktoren dargestellt.

Tabelle 6.2-1: Kosten bei Übergang zur Kleinserienfertigung in Euro pro m² Fassadenfläche: Detailübersicht (links: Schätzung Variotec, rechts: Schätzung IGRT)

Kosten GEDT - Kleinserie Schätzung Variotec		
VIP	186 €	
Metallteile	216 €	
Kerto	27 €	
BFU	11 €	
Resoplan (Fassade)	150 €	
Sonstiges	10 €	
Fenster (anteilig)	30 €	
Summe:	**Material**	**631 €**
Fertigung		
Personal Fertigung	108 €	
CNC-Programmierung	28 €	
Summe:	**Produktion**	**136 €**
Transport und Montage		
Aufmaß	10 €	
Transport	11 €	
Transportvorrichtungen	20 €	
Montagetraverse		
Hebebühne/Gerüst	6 €	
Montagekran/-stapler	13 €	
Montagekosten	36 €	
Summe:	**Transport/Montage**	**96 €**
	50 €	
Summe:	**Planung**	**50 €**
	Gesamtkosten	**913 €**

Kosten GEDT - Kleinserie Schätzung IGRT		
VIP	188 €	
Metallteile	200 €	
Kerto	31 €	
BFU	11 €	
Resoplan (Fassade)	159 €	
Sonstiges	11 €	
Fenster (anteilig)	44 €	
Summe:	**Material**	**644 €**
Fertigung		
Personal Fertigung	80 €	
CNC-Programmierung	20 €	
Summe:	**Produktion**	**100 €**
Transport und Montage		
Aufmaß	10 €	
Transport	11 €	
Transportvorrichtungen	0 €	
Montagetraverse		
Hebebühne/Gerüst	6 €	
Montagekran/-stapler	13 €	
Montagekosten	30 €	
Summe:	**Transport/Montage**	**70 €**
	35 €	
Summe:	**Planung**	**35 €**
	Gesamtkosten	**849 €**

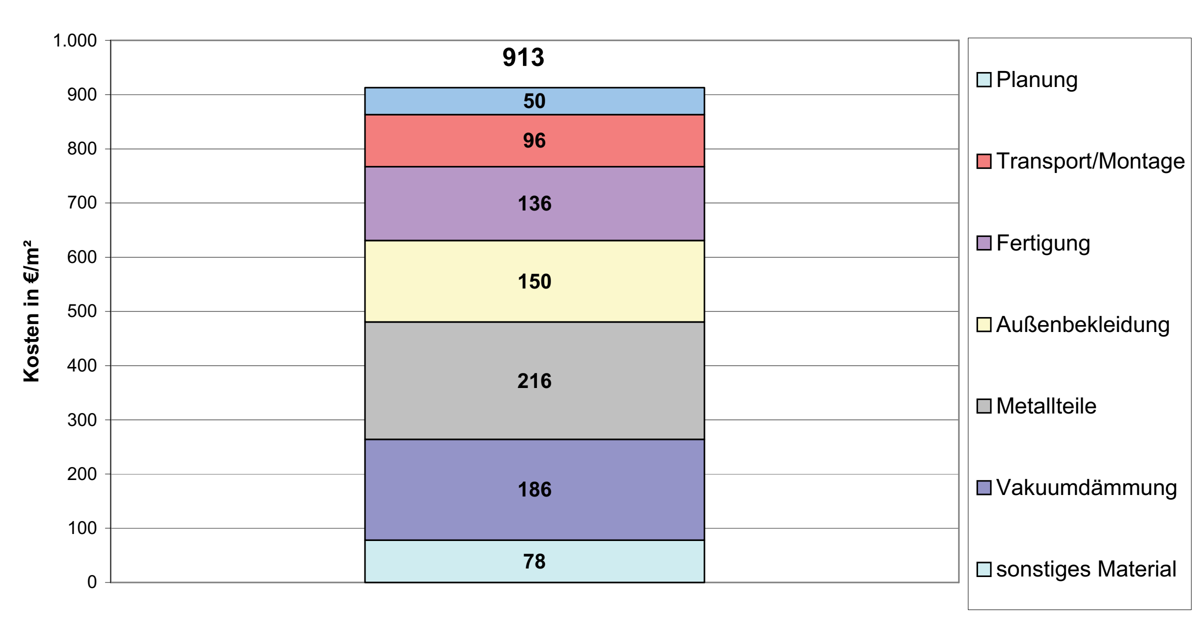


Abbildung 6.2-1: Kosten der GEDT-Fassedenelemente bei Übergang zur Kleinserienfertigung (Schätzung Variotec)

Die Kostenschätzungen von Variotec und IGRT liegen in einer ähnlichen Größenordnung (850-910 €/m²). Im Folgenden werden die Zahlen von Variotec berücksichtigt bzw. gerundete Zahlen verwendet. In der Tabelle und im Diagramm ist zu erkennen, dass die mögliche Kostensenkung bei Übergang zu einem Produktionsvolumen von 1000 m² pro Jahr nach Schätzung des Produzenten zwar merklich ausfällt, aber noch keinen entscheidenden Durchbruch bedeutet. Gegenüber vorher etwa 1200 €/m² ergeben sich nun rund 900 €/m².

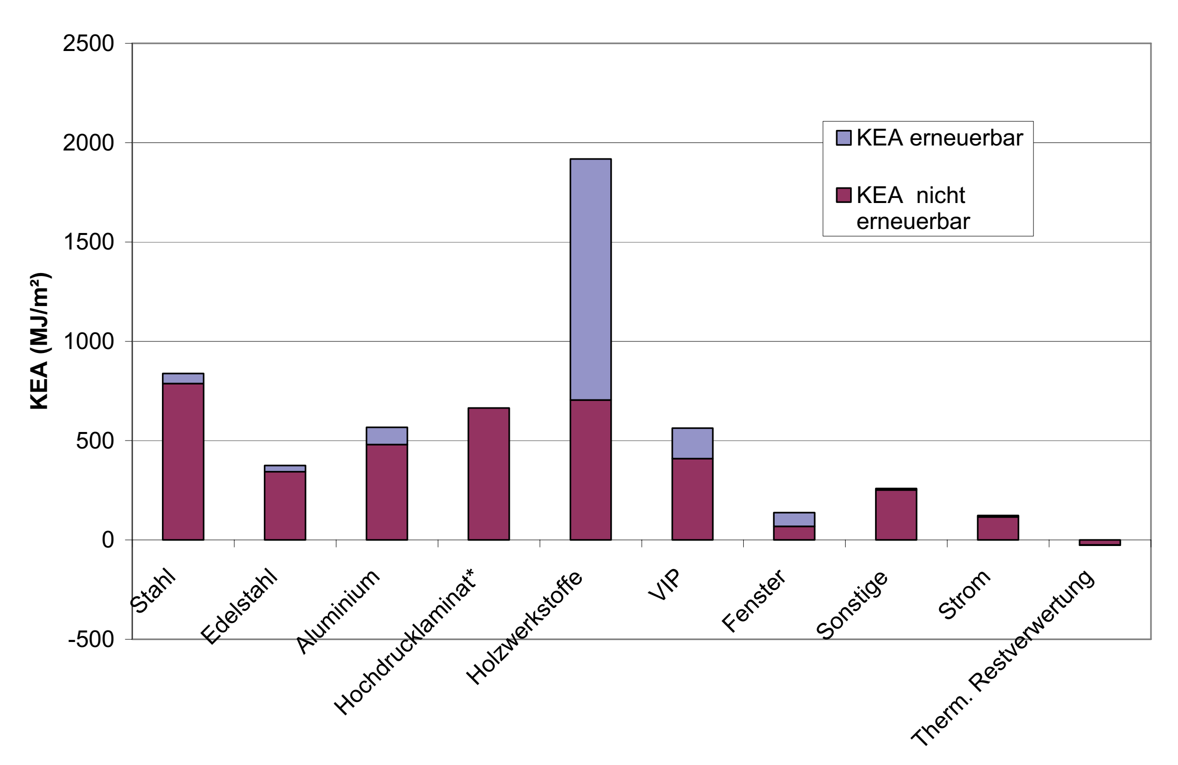
Kostensenkungsmöglichkeiten werden vor allem bei den Metallteilen und bei den Planungskosten gesehen. Letztere waren aber im Modellprojekt wie gesagt nur grob abgeschätzt worden. Weitere, geringere Kostenreduktionen betreffen einige Materialen bei der Fertigung (Kerto, Resoplan) sowie die Wiederverwendung von Transportvorrichtungen und der Montage-Traverse. Im Fall der Fenster wurde von einem konventionellen Bauteil mit 2-Scheiben-Wärmeschutzverglasung statt einem Passivhausfenster ausgegangen. Die Auswirkungen dieses Ansatzes auf die Gesamtkosten sind aber eher gering.
Insgesamt zeigt sich also, dass die bei einer Kleinserienfertigung kurzfristig zu realisierenden Kostensenkungen noch keinen Übergang in einen marktfähigen Kostenbereich erwarten lassen. Dabei darf allerdings nicht vergessen werden, dass ein Fertigungsvolumen von 1000 m² pro Jahr noch nicht besonders groß ist. So wurden allein im Projekt Hofheim bereits etwa 180 m² an GEDT-Fassadenfläche montiert.
Von Interesse wäre vor diesem Hintergrund die Frage, wie sich die Kosten bei Übergang zu einer Großserienfertigung gestalten würden. Hierbei wäre auch eine genauere Analyse von Rationalisierungsmöglichkeiten während des Produktionsprozesses durchzuführen.
Eine derartige Untersuchung würde allerdings den Rahmen des Forschungsprojekts sprengen. Darüber hinaus ist es sehr unwahrscheinlich, dass eine solche Fertigung sich exakt an dem GEDT-Konzept ausrichten würde, wie es in Hofheim in der Erstanwendung realisiert wurde. Vielmehr wäre zu empfehlen, zunächst die Möglichkeiten der Weiterentwicklung umzusetzen, zu denen in Kapitel 8 einige Hinweise gegeben wurden.

7 Lebenszyklusanalyse

Im Rahmen einer durch die Technische Universität Darmstadt[8] und das IWU betreuten Diplomarbeit wurde eine Lebenszyklusanalyse der in Hofheim eingesetzten Großelemente mit Vakuumdämmung durchgeführt [Gropp 2007]. Es wurde insbesondere der kumulierte Energieaufwand (KEA) nach VDI-Richtlinie 4600 untersucht. Dabei handelt es sich um den Gesamtaufwand aller bei der Herstellung, Nutzung und Entsorgung anfallenden Primärenergieträger inklusive der Vorketten, hier angegeben in MJ pro m² Elementfläche. Die Analyse wurde mit Hilfe der Software Umberto [IFU 2001] und der Datenbank Ecoinvent[9] durchgeführt. Die Arbeit wurde dabei auch durch das Forschungszentrum Karlsruhe, Zentralabteilung Technikbedingte Stoffströme, unterstützt. Im vorliegenden Kapitel werden die Ergebnisse der Diplomarbeit bzw. von darauf aufbauenden Berechnungen des IWU dargestellt.

7.1 Ergebnisse

Die folgende Abbildung 7.1-1 zeigt die Energiebilanz der Herstellung des Großdämmelements. Der kumulierte Energieaufwand ist getrennt nach den Anteilen erneuerbarer und nicht-erneuerbarer Energieträger dargestellt. Entscheidend für Ressourcenverbrauch und Umweltauswirkungen ist – wenn auch nicht ausschließlich, so doch vorwiegend – der nicht-erneuerbare Anteil, auf den daher bei den folgenden Bewertungen das Hauptaugenmerk gerichtet wird.



*Schätzwert für Hochdrucklaminat

Abbildung 7.1-1: Kumulierter Energieaufwand für die Herstellung eines Großelements mit Vakuumdämmung nach Stoffgruppen (bezogen auf 1 m² Elementfläche)

[8] Institut WAR, Fachgebiet Industrielle Stoffkreisläufe, Prof. Dr. Liselotte Schebek

[9] Siehe, www.ecoinvent.org, Swiss Centre for Life Cycle Inventories

Es ist zu erkennen, dass insgesamt sechs Stoffgruppen den Hauptanteil am Herstellungs-Energieaufwand tragen, und zwar die Metalle Stahl, Edelstahl und Aluminium, die Holzwerkstoffe (vor allem Kerto und BFU) und das Hochdrucklaminat (Fassadenplatten). Der relativ hohe Anteil der Holzwerkstoffe am Gesamt-KEA von ca. 35 % korrespondiert mit deren Massenanteil am Gesamtelement (ca. 37 %). Dabei ist zu beachten, dass die Schichthölzer erhebliche Anteile von Kunstharz-Werkstoffen enthalten, durch die sich die Beiträge zum Herstellungs-Energieaufwand erklären lassen. Das Fenster fällt nicht zuletzt aufgrund seines geringen Flächenanteils am Gesamtelement kaum ins Gewicht. Auch die sonstigen Stoffe (u. a. Folien, Klebebänder, Klebstoffe, Mineralwolle-Ausgleichsdämmung) und der (primärenergetisch bewertete) Stromverbrauch bei der Werksmontage liefern eher kleinere Beiträge. Durch die thermische Verwertung von Stoffen, die während des Herstellungsprozesses anfallen, ergibt sich eine geringe Gutschrift (negativer KEA-Wert). Gutschriften für die Verwendung von Reststoffen bei der Produktion sind beim Stahl, Edelstahl und Aluminium bereits mit eingerechnet. Im Fall des Vakuum-Isolationspaneels (VIP) wurde eine Gutschrift für den bei der Produktion anfallenden und weiter verwertbaren Chlorwasserstoff angesetzt (s. u.).

Die Einzelbeiträge der verschiedenen Materialien summieren sich zu einem nicht-erneuerbaren KEA-Gesamtwert von 3798 MJ/m² für die Herstellung des Elements. Dazu kommen 1616 MJ/m² erneuerbarer Anteil, insgesamt ergeben sich also 5414 MJ/m².

Für den KEA des Hochdrucklaminats kann hier – wegen bisher noch nicht erfolgter Freigabe von Herstellerdaten - nur ein Schätzwert angegeben werden. Der Wert wurde aus [Abet 1999] abgeleitet. Dort werden Angaben für die Herstellung einer 1 mm dicken Hochdrucklaminatschicht für die Innenraumanwendung gemacht. Diese Werte wurden hier vereinfachend über die Schichtdicke auf die 8 mm-Fassadenplatten hochgerechnet. Aus der Quelle ist nicht erkennbar, ob und inwieweit der angegebene Wert erneuerbare Energieanteile enthält. Im Sinne einer vorsichtigen Abschätzung für den Gesamtaufwand wird er hier vollständig als nicht-erneuerbarer Anteil verbucht.

Die folgenden beiden Abbildungen geben den vollständigen Lebensweg des Großdämmelements mit den Stationen Herstellung, Transport und Montage sowie Entsorgung wieder[10]. Dabei wurden zwei Fälle betrachtet:

- Fall 1: Bei der Entsorgung werden die Metalle (Stahl, Edelstahl und Aluminium) abgetrennt und recycelt. Die restlichen Anteile werden thermisch verwertet (in einem Müll-Heizkraftwerk verbrannt) und dann deponiert.
- Fall 2: Zusätzlich wird hier unterstellt, dass der VIP-Kern aus pyrogener Kieselsäure abgetrennt und wieder zur Produktion neuer Vakuum-Paneele verwendet werden kann. Dabei handelt es sich um ein hypothetisches Szenario: Inwieweit dieser Weg tatsächlich praktisch realisierbar ist, konnte hier nicht untersucht werden. Allerdings sei darauf hingewiesen, dass auch im vorliegenden Projekt eine Wiederverwendung des Kerns von Vakuum-Isolationspaneelen eines nicht mehr nutzbaren Großelements realisiert werden konnte (vgl. Kap. 3.3).

Die Ergebnisse für den Lebensweg des Elements sind in Abbildung 7.1-2 für den Fall 2 dargestellt. Insgesamt ergibt sich ein nicht-regenerativer KEA von 2949 MJ/m². Der Gesamtwert inklusive erneuerbaren Energieträgern beträgt 4338 MJ/m².

[10] Während der Nutzungsphase treten keine weiteren Beiträge auf. Die während der Nutzung erreichte Energieeinsparung wird am Ende dieses Abschnitts im Zusammenhang mit dem „Erntefaktor“ diskutiert.

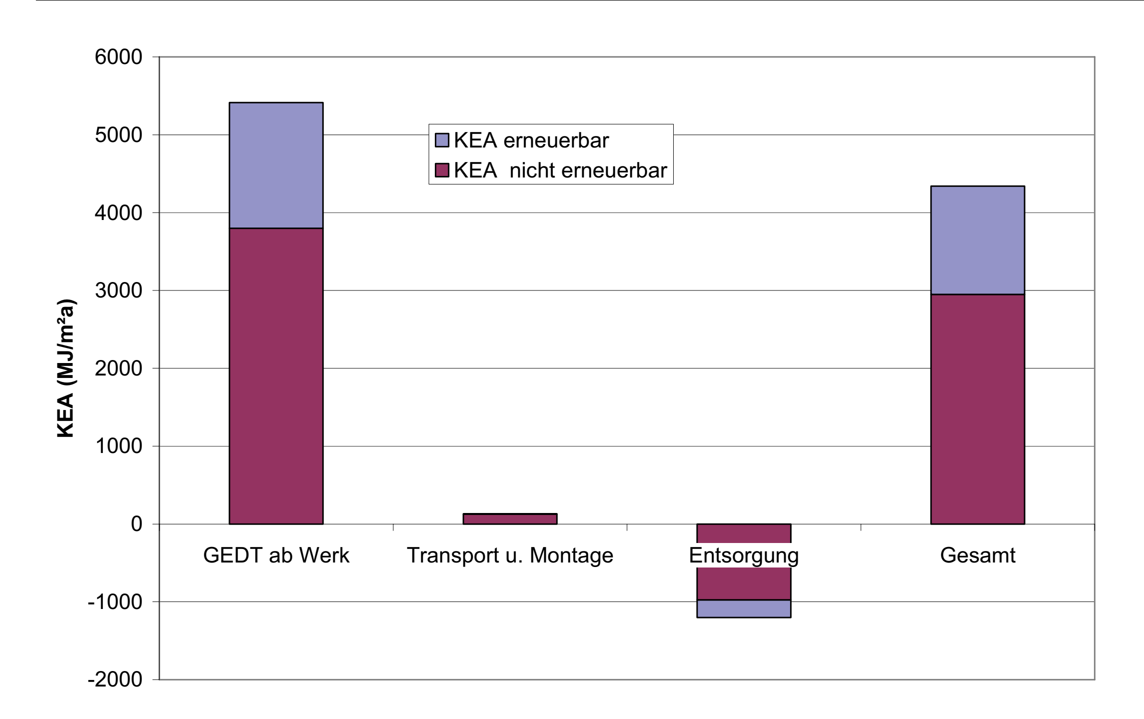


Abbildung 7.1-2: Bilanz des GEDT-Lebenswegs im Fall 2 (mit Recycling der pyrogenen Kieselsäure).

Eine genauere Darstellung der Entsorgung zeigt die folgende Abbildung 7.1-3. Die Gutschrift durch das Recycling der pyrogenen Kieselsäure beträgt rund 215 MJ/m² (nicht-erneuerbare Energie) bzw. 330 MJ/m² (Gesamt-KEA). Für den Gesamt-Lebensweg im Fall 1 (ohne Wiederverwertung des VIP-Kerns) ergeben sich insgesamt etwas ungünstigere Werte von 3181 MJ/m² (nicht-erneuerbar) bzw. 4688 MJ/m² (gesamt)[11].

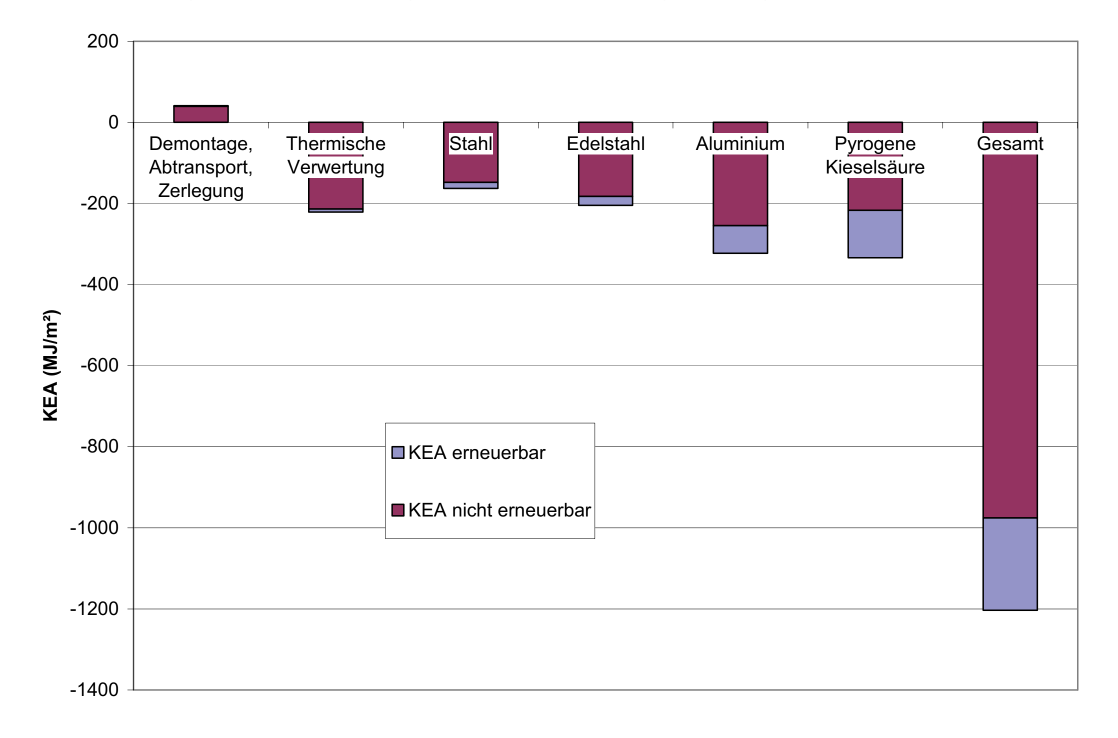


Abbildung 7.1-3: Entsorgungsbilanz im Fall 2 (mit Recycling der pyrogenen Kieselsäure)

[11] Leichte Unterschiede zwischen Fall 1 und Fall 2 bestehen neben den genannten Beiträgen durch Recycling der pyrogenen Kieselsäure auch bei der thermischen Verwertung.

Der Lebensweg des Vakuum-Isolationspaneels ist in Abbildung 7.1-4 separat dargestellt[12]. Es ist zu erkennen, dass durch das Recycling der pyrogenen Kieselsäure der nicht-regenerative KEA gegenüber der Herstellung des Paneels ungefähr halbiert werden könnte.

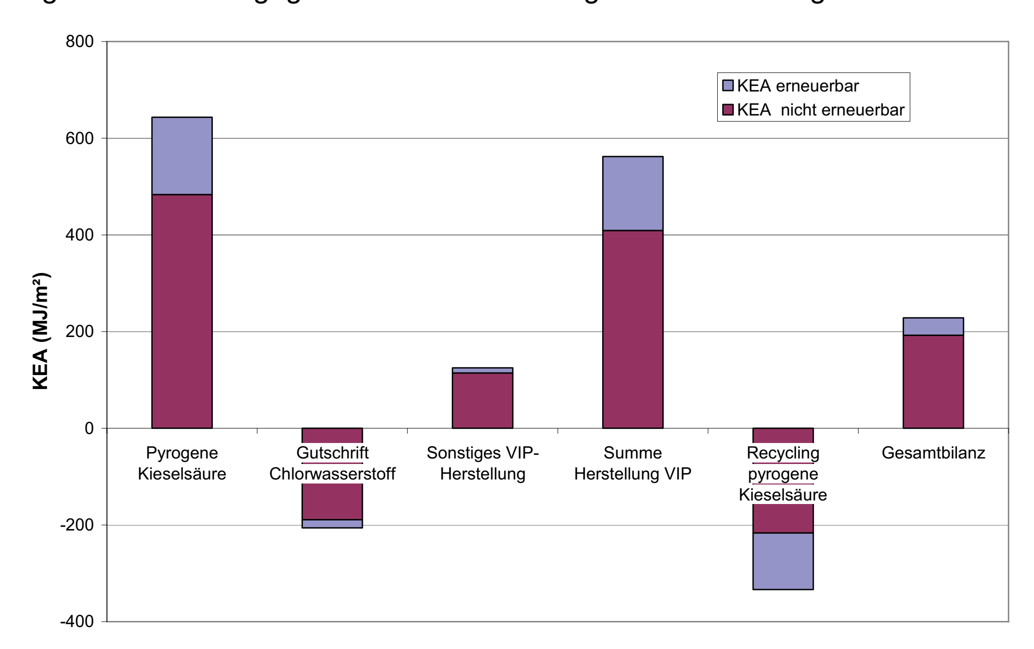


Abbildung 7.1-4: Lebensweg-Bilanz eines Vakuum-Isolationspaneels

Der kumulierte Energieaufwand des Großdämmelements kann mit der Primärenergieeinsparung durch den reduzierten Heizwärmebedarf verglichen werden. Im Folgenden wird von diesen Randbedingungen ausgegangen:

- Wärmeerzeugung in einem Erdgaskessel mit 95 % Jahresnutzungsgrad
- KEA von 1 MJ Erdgas (unterer Heizwert): 1,24 MJ (davon 1,23 MJ nicht regenerativ)[13]
- U-Wert des Großdämmelements mit VIP: U = 0,18 W/m²K
- U-Wert der Wand vor der Modernisierung: (typische ungedämmte Altbauwand): U = 1,4 W/m²K
- Gradtagzahl: 66 kKh/a (gemäß EnEV-Jahresbilanz für Neubauten, also für gedämmte Gebäude)

Zum Vergleich wird ein herkömmliches Wärmedämmverbundsystem (WDVS) mit Polystyrol-Hartschaumdämmung (EPS) betrachtet. Der kumulierte Energieaufwand wurde in [Gropp 2007] ebenfalls ermittelt: Es ergeben sich über den gesamten Lebensweg (Herstellung und Entsorgung) 592 MJ (erneuerbarer und nicht erneuerbarer Anteil).

Berechnet wird der Erntefaktor EF, indem der während der Nutzungsphase durch die Wärmedämmung eingesparte KEA durch den KEA des Dämmelements (für Herstellung und Entsorgung) dividiert wird. Für den GEDT-Lebensweg wird hier von Fall 1 (ohne Recycling der pyrogenen Kieselsäure) ausgegangen. Berücksichtigt wird nur der nicht-erneuerbare Anteil des KEA des Großdämmelements und der Erdgas-Einsparung[14]. In Abbildung 7.1-5 sind die Ergebnisse in Abhängigkeit von der Lebensdauer des Dämmelements aufgetragen.

---

[12] Bei der Erstellung des Modells für das VIP in [Gropp 2007] wurde insbesondere auf die Studie [BFE 2003] zurückgegriffen.

[13] Ermittelt aus [Gropp 2007]

[14] Im Fall des Wärmedämmverbundsystems ist der nicht-regenerative Anteil in der Gesamtbilanz nicht gesondert ausgewiesen. Vereinfachend wird hier der Gesamt-KEA von 592 MJ/m² in Ansatz gebracht. Darin sind Gutschriften für Herstellung und Entsorgung verrechnet. Ohne Anrechnung dieser Gutschriften kann

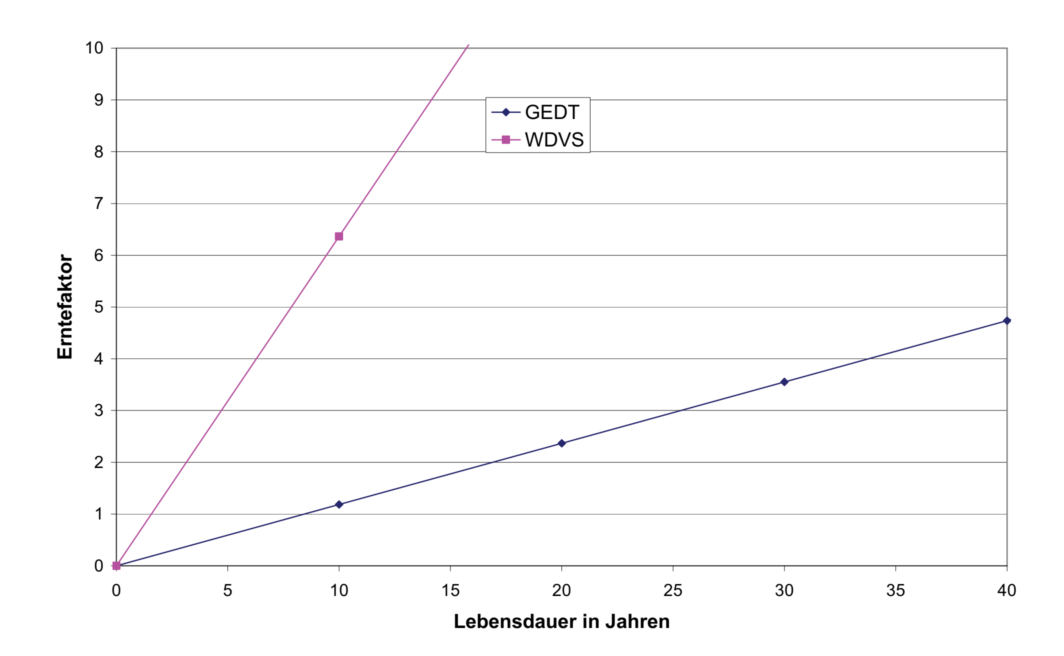


Abbildung 7.1-5: Erntefaktoren des GEDT-Elements (Fall 1) mit Vakuumdämmung und eines EPS-Wärmedämmverbundsystems (WDVS) in Abhängigkeit von der Lebensdauer (Bewertungsbasis: Kumulierter Energieaufwand)

Unter Annahme einer Lebensdauer von 30 Jahren betrüge der Erntefaktor des Großdämmelements ungefähr 3,5, d. h. das Element hätte dann das 3,5-fache seiner Herstellungsenergie (inklusive Entsorgung) eingespart. Betrüge die Lebensdauer nur 8,5 Jahre, so ergäbe sich ein Erntefaktor von 1, d. h. der KEA des Elements und die bei der Beheizung eingesparte Primärenergie glichen sich dann gerade aus.
Das Wärmedämmverbundsystem liegt aufgrund seiner viel niedrigeren Herstellungsenergie deutlich günstiger: Bei 30 Jahren Lebensdauer würde hier ein Erntefaktor von 19 erreicht (in der Abbildung 7.1-5 nicht mehr dargestellt). Bereits bei einer Lebensdauer von etwa 1,5 Jahren betrüge der Erntefaktor 1.
Neben dem KEA wurde, ebenfalls unter Berücksichtigung der Vorketten, auch das Global Warming Potential GWP untersucht. Es beinhaltet die Summe aller Treibhausgase umgerechnet in die Menge CO_2-Emissionen, die über 100 Jahre in der Atmosphäre dieselbe Klimawirkung hervorrufen würde. Das GWP wird in kg CO_2-Äquivalent pro m² Elementfläche angegeben. Für das GEDT-Element wurde ein Wert von rund 160 kg/m² ermittelt (Fall 1 ohne Recycling der pyrogenen Kieselsäure). Für das Wärmedämmverbundsystem beträgt der Wert dagegen nur ca. 36 kg/m².

<u>Fazit</u>
Diese Betrachtungen zeigen, dass die Lebenszyklus-Bilanz des Großdämmelements zwar bei normaler Lebensdauer baulicher Maßnahmen von mehreren Jahrzehnten ein positives Gesamtergebnis erbringt, insgesamt aber nicht zufrieden stellen kann. Eine „Verschlankung“ der Konstruktion, also ein geringerer Materialeinsatz pro Elementfläche, wäre daher als ein wichtiges Ziel der Weiterentwicklung anzusehen.

---

die Aufspaltung des KEA angegeben werden: Er beträgt ca. 695 MJ/m², davon 617 MJ/m² nicht-erneuerbarer und 78 MJ/m² erneuerbarer Anteil.

8 Schlussfolgerungen und Perspektiven

8.1 Zusammenfassung der Erfahrungen

In dem vorliegenden Forschungsprojekt sollte mit der „Großelement-Dämmtechnik (GEDT) mit Vakuumdämmung“ ein neues Konzept zur Dämmung von Außenwänden entwickelt und unmittelbar in die Anwendung überführt werden. Die besonderen Charakteristika dieses Ansatzes sind:

- Einsatz vorgefertigter geschosshoher Großelemente bei der Altbausanierung
- Einsatz von Vakuum-Isolationspaneelen (VIP) als Dämmkern
- Integration der Fenster in die Großelemente.

Das angestrebte Ziel wurde in dem Forschungsvorhaben erreicht. Die Entwicklung und Erstanwendung der neuen Dämmtechnologie konnte erfolgreich abgeschlossen werden.

Dabei hatte sich das Vorhaben als schwieriger herausgestellt, als im Vorfeld erwartet worden war. Eine besondere Herausforderung bestand darin, die Entwicklung parallel zu dem Modernisierungsvorhaben durchzuführen, bei dem sie direkt angewendet werden sollte. Ein solcher Ansatz erschien zunächst als gerechtfertigt, da bei der Großelement-Dämmtechnik auf Testanwendungen mit konventioneller Dämmung zurückgegriffen werden konnte. Es zeigte sich aber im Laufe des Projekts sehr schnell, dass hier eine weitgehende Neuentwicklung notwendig war. Der Grund lag vor allem in der mangelnden statischen Belastbarkeit der Vakuumisolationspaneele für den aus Sicherheitsgründen unterstellten pessimistischen Fall, dass sie defekt, also belüftet sind. Als Folge davon konnte das „Sandwichprinzip“, das sonst bei schichtweise aufgebauten Elementen eine Lastübertragung von einer Ebene in die nächste erlaubt, im Bereich der Vakuum-Dämmpaneele nicht genutzt werden. Stattdessen mussten die statischen Aufgaben durch neu zu entwickelnden Stahl-Bauteile übernommen werden. Stahlanker durchdrangen zum Teil die von den VIPs gebildete Dämmebene und führten dadurch auch zu verstärkten Wärmebrückeneffekten. Diese konnten aber angesichts eines Beitrags von ca. 15 % zum Wärmedurchgangskoeffizienten der Gesamtkonstruktion (U= 0,19 W/m²K) letztlich in vernünftigen Grenzen gehalten werden.

Trotz aller Schwierigkeiten konnte am Ende demonstriert werden, dass die neue Technologie in der Baupraxis realisierbar ist. Ein entscheidender Punkt im Projektverlauf war das Aufhängen der 12 Elemente vor Ort in Hofheim: Auch dieses erfolgte in dieser Erstanwendung nicht so reibungslos, wie man das für die Zukunft erwarten würde, denn ein Motiv für die Anwendung von Großelementen besteht ja gerade darin, Arbeitsleistungen und Arbeitszeit von der Vor-Ort-Montage auf der Baustelle zur Vorfertigung im Werk zu verschieben. Letztlich ist aber festzustellen, dass die Koordination der verschiedenen Beteiligten vom Entwickler über den Planer bis zum Arbeiter im Werk und Monteur vor Ort erfolgreich war und die engen Vorgaben, die an die Maßhaltigkeit einer solchen Konstruktion zu stellen sind, auch in einem realen Bauprozess eingehalten werden können.
Auch die ersten Messungen (Funktionskontrolle der Vakuum-Isolationspaneele, Verlauf von Temperatur und Feuchte an verschiedenen Stellen des Elements sowie Schalldämmung) zeigen sehr befriedigende Ergebnisse. Angesichts eines Anteils von nur ca. 3 % defekter

Vakuum-Isolationspaneele kann man davon ausgehen, dass das Ziel, durch die Vorfertigung im Werk einen guten Schutz der empfindlichen Paneele zu realisieren, erreicht werden konnte.

Auch wenn das neue Dämmkonzept also erfolgreich umgesetzt wurde, war gleichzeitig sicherlich nicht zu erwarten, dass in einem solchen Projekt - sozusagen aus dem Stand heraus - direkt ein marktfähiges Produkt entwickelt werden könnte.
Die Kosten der GEDT-Elemente lagen im Modellprojekt bei ca. 1200 € pro Quadratmeter Elementfläche und könnten nach ersten Schätzungen durch eine Kleinserienfertigung auf ca. 900 €/m² gesenkt werden. Diese Werte liegen in einer Größenordnung über den Kosten üblicher Außenwanddämmsysteme. Ein solches Ergebnis kann bei der Erstentwicklung und Erstanwendung eines komplexen neuen Systems letztlich nicht überraschen und erlaubt noch kein Urteil über die zukünftigen Anwendungsmöglichkeiten. Auch besteht nicht unbedingt eine direkte Konkurrenz zu Standard-Wärmeschutzmaßnahmen: Die Anwendung der Vakuumdämmung ist ja zunächst einmal für besondere Situationen von Interesse, in denen die erwünschten Wärmeschutzeigenschaften bei gleichzeitig begrenzter Schichtdicke mit herkömmlichen Dämmstoffen nicht mehr erreicht werden können. Außerdem ist zu berücksichtigen, dass es insbesondere im Nichtwohnungsbau einen Markt auch für hochpreisige Fassadensysteme (mit Kosten bis über 1000 €/m² gibt). Davon abgesehen sind die hohen Kostenwerte aber natürlich ein Hinweis darauf, dass vor einer breiteren Anwendung dieses Systems die Möglichkeiten einer Weiterentwicklung ausgeschöpft werden sollten.
Diese Schlussfolgerung wird auch durch die energetische Lebenszyklusanlayse nahe gelegt: Grundsätzlich ist das Ergebnis positiv: Durch den verbesserten Wärmeschutz spart das System ein Mehrfaches (nämlich das 3,5-fache) der für die Herstellung aufgewendeten Energie ein. Aber auch hier fällt der Vergleich mit einer herkömmlichen Außenwanddämmung ungünstig aus: Bei einem Wärmedämmverbundsystem mit gleicher Dämmwirkung liegt die Herstellungsenergie fast um einen Faktor 20 niedriger als die erreichte Energieeinsparung.

Vor diesem Hintergrund werden im Folgenden Ansatzpunkte für eine mögliche Weiterentwicklung des Konzepts diskutiert. Dabei handelt es sich naturgemäß um eine erste Ideensammlung der Projektpartner, die keinen Anspruch darauf erhebt, optimal umsetzbare Lösungen anzubieten. Erst eine detailliertere Planung, die im Rahmen dieses Projekts nicht mehr möglich ist, könnte zeigen, welche Rückwirkungen die einzelnen Ansätze auf das jeweilige Gesamtsystem hätten und ob eine Realisierung tatsächlich sinnvoll und möglich wäre.

8.2 Ansätze für eine Weiterentwicklung

Grundsätzlich können vor allem folgende Ziele für die Weiterentwicklung formuliert werden:

- Kostensenkung
- Vereinfachung von Produktion und Montage
- „Verschlankung“, d. h. Einsparung von Material (und damit auch Herstellungsenergie) sowie weitere Reduzierung der Schichtdicke
- Revisionierbarkeit (Austausch defekter VIPs).

Im Folgenden werden einige Gedanken zur Weiterentwicklung im Hinblick auf verschiedene Eigenschaften und Systemkomponenten der Großelemente skizziert.

8.2.1 Elementaufbau (Materialeinsparung)

Angesichts des Ziels der Materialeinsparung und Verschlankung stellt sich die Frage, inwieweit durch Optimierung der Konstruktion einzelne Bauteile der GEDT-Elemente verkleinert oder eingespart werden können.

Nach Auffassung des Projektpartners IGRT sind bei dem vorhandenen Elementaufbau nur begrenzte Spielräume vorhanden. Insbesondere werden aus statischen Gründen kaum Möglichkeiten für Beschränkungen bei den vorhandenen Metallteilen gesehen. Die Möglichkeiten der Aufwandsreduzierung durch weitere Optimierungen werden in einer Größenordnung von 5 – 10 % gesehen. Eine Verbesserung der Situation könnte erreicht werden, wenn man nicht – im Sinne eines „worst case“ – von vollständig belüfteten Vakuum-Isolationspaneelen ausgehen müsste. Um hier weitere Aussagen machen zu können, wären aber zunächst umfassende Untersuchungen und vor allem auch die Einbeziehung neuer Ansätze bezüglich der Sicherheitsphilosophie notwendig.

Vor diesem Hintergrund stellt sich die Frage, ob es Ansätze für grundlegende Änderungen an dem Konzept für den Elementaufbau geben kann. Dabei könnte z. B. auch geprüft werden, ob es denkbar wäre, auf die äußere oder innere Schale (bisher: BFU bzw. Kerto) zu verzichten. Eine erste, von der PlanungsgruppeDREI in dieser Richtung formulierte Idee, ist im Folgenden skizziert. Es wird ein Konzept für den Verzicht auf die innere Tragschale, die bisherige Kerto-Platte, dargestellt.

Die äußere Tragschale übernimmt in diesem Fall Last-abtragende und Fassaden-Eigenschaften. Die VIPs sind mit der äußeren Tragschale verklebt. Innenseitig werden die VIPs mit einer schützenden Bekleidung versehen (Abbildung 8.2-1).

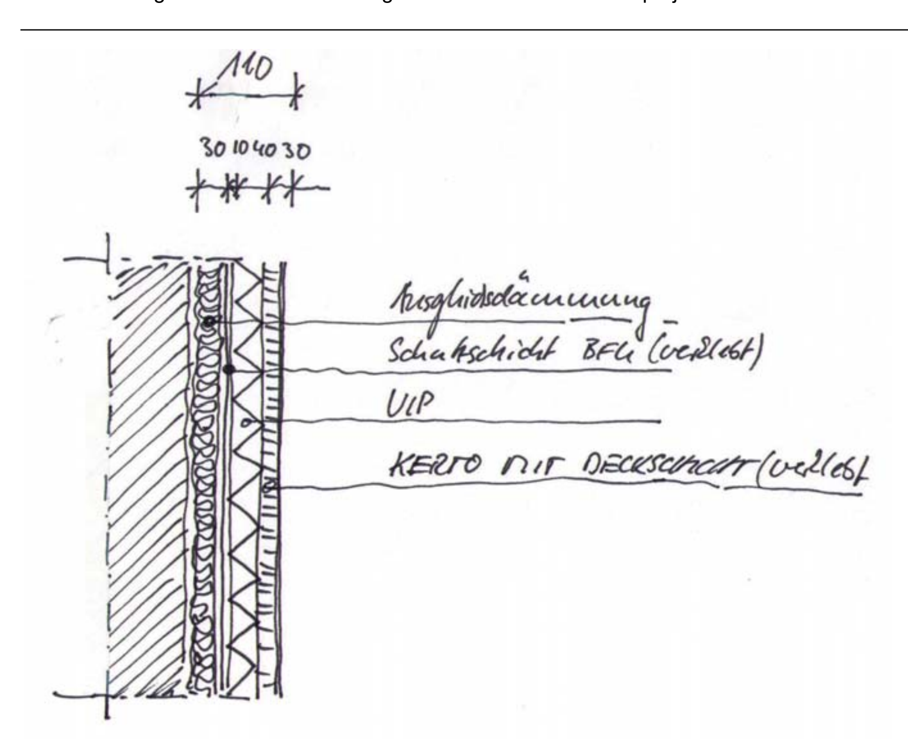


Abbildung 8.2-1: Prinzipdarstellung des alternativen Elementaufbaus (PDrei)

Für den oben skizzierten Elementaufbau ist die folgende Tragstruktur angedacht:

- Die einzelnen Elemente werden zwischen vertikal-lastabtragenden Konsolen „eingespannt“: Diese Konsolen befinden sich bei 2- bis 3-geschossigen Gebäuden im Sockel- und Dachbereich, bei höheren Gebäuden wäre ein zusätzliche Konsole in Fassadenmitte vorzusehen (Abbildung 8.2-2).
- Die Horizontalkräfte werden über filigrane, schwach wärmeleitende Zug- und Druckstreben in regelmäßigem Raster in die Bestandwand eingeleitet.

Im Idealfall (niedrige Gebäudehöhe) besteht somit die Fassade in vertikaler Richtung aus nur einem vorgefertigten Fassadenelement. Die entstehenden VIP-VIP-Fugen werden mit vorkomprimiertem Dichtband geschlossen. Die vertikalen Elementfugen werden bauseits mit vorkomprimierten Dichtbändern geschlossen.

Eine weitere Alternative mit kleineren Elementen ist in Kapitel 8.2.6 dargestellt.

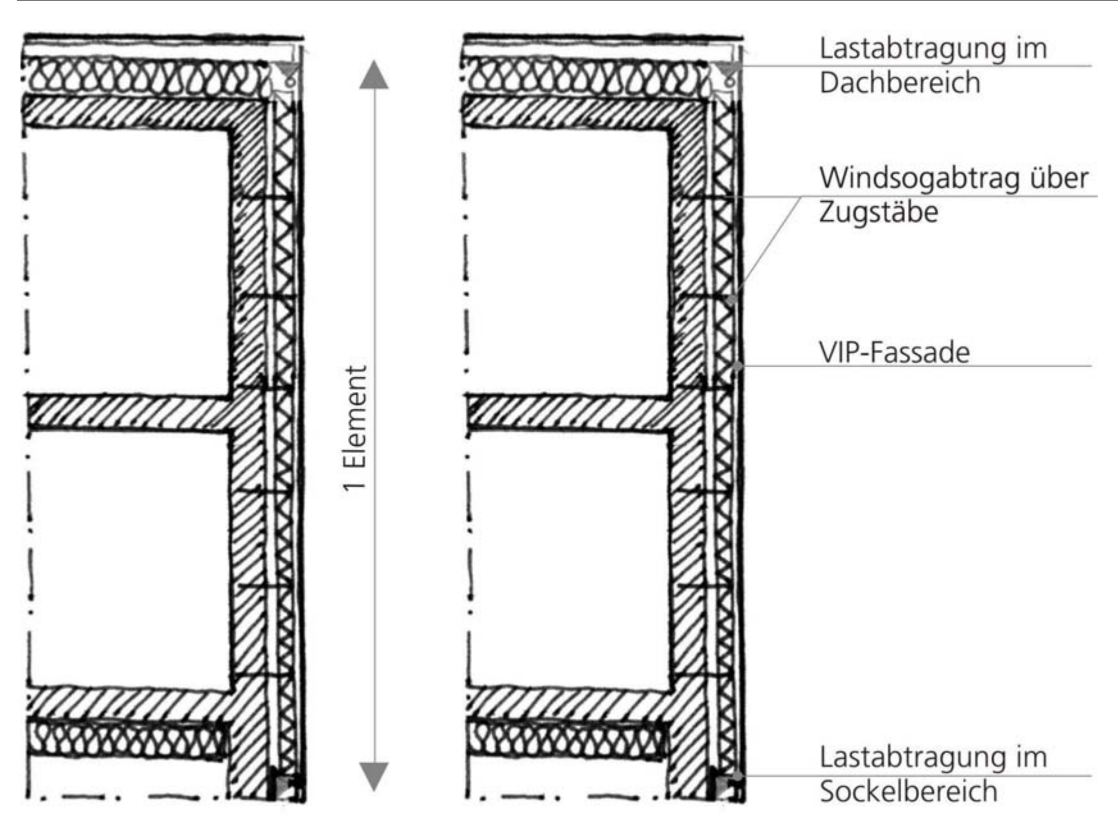


Abbildung 8.2-2: Aufbau einer „hängenden“ Fassade (PDrei)

8.2.2 Außenbekleidung

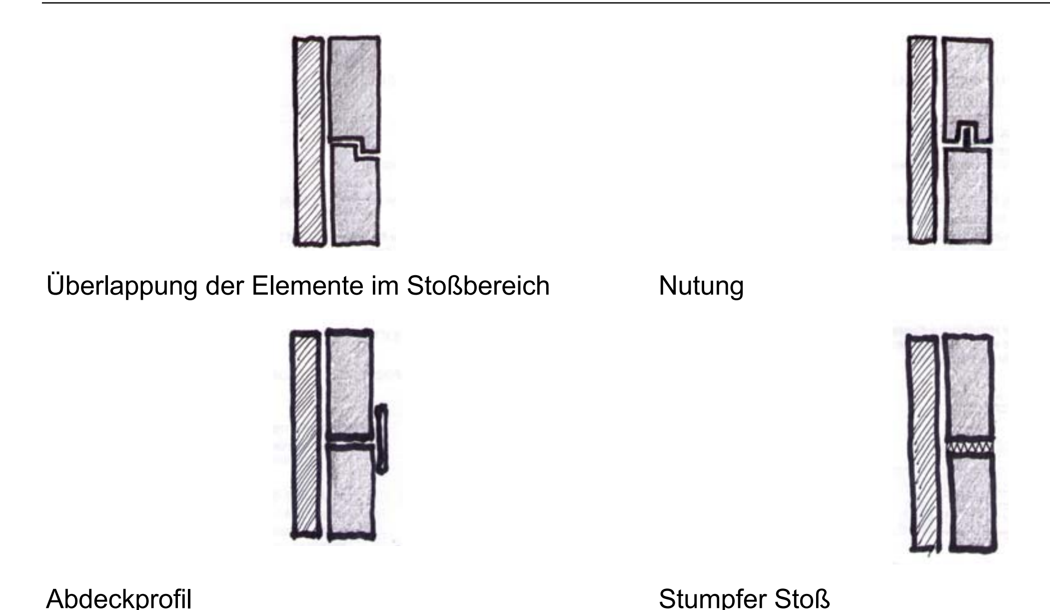
Die Wahl der Außenbekleidung war im Laufe des Projekts – unter Berücksichtigung möglicher Alternativen - ausführlich überlegt und diskutiert worden (vgl. Kap. 2.4.6). Die gewählte hinterlüftete Konstruktion bringt verschiedene bauphysikalische und konstruktive Vorteile mit sich. Beispielsweise müssen die Elementfugen durch den Wetterschutz, den die vorgehängte Fassade bietet, nicht schlagregendicht sein. Bei einer freien Bewitterung der GEDT wäre die Auswahl der einzusetzenden Dichtungsbänder erheblich eingeschränkt. Damit würden energetische Optimierungen im Fugenbereich erschwert.

Aber auch hier stellt sich natürlich die Frage nach weiteren Verbesserungsmöglichkeiten: Die Fassadenbekleidung hat einen nicht unerheblichen Anteil an den Kosten und der Herstellungsenergie. Darüber hinaus trägt eine hinterlüftete Fassade durch ihre Luftschicht auch wesentlich zur Gesamtdicke des Elements bei. Schließlich steht eine nachträgliche Installation von Fassadenplatten vor Ort nicht vollständig mit dem Grundgedanken der Vorfertigung, d. h. der Verlagerung der Arbeiten von der Baustelle ins Werk, im Einklang.

Im Folgenden sind einige grundsätzliche Überlegungen des Projektpartners PDrei zur Entwicklung von vorfabrizierten Fassadenelementen ohne Hinterlüftung dargestellt.

Eine Fassade ohne Hinterlüftung wird als Warmfassade bezeichnet. Dabei müssten zum einen die genannten Schwächen der Fassade ohne zusätzlichen Witterungsschutz bedacht und gezielt eliminiert werden. Zum anderen müsste die Außenfläche der Tragschale ohne überstehende konstruktive Verbindungen ausgeführt werden (Bei der jetzigen GEDT-Entwicklung wurde der Hinterlüftungsraum als Verschraubungs-Ebene genutzt).

Fugen könnten - grundsätzlich betrachtet - durch folgende Lösungen geschützt werden (Abbildung 8.2-3):



Überlappung der Elemente im Stoßbereich

Nutung

Abdeckprofil

Stumpfer Stoß
Ein störungsfreier Einbau und die regelmäßige Wartung der Fugenverschlüsse (z. B. schlagregendichte vorkomprimierte Dichtbänder – „Dehnungsfugen sind Wartungsfugen“) wäre zu beachten.

Abbildung 8.2-3: Darstellung verschiedener Möglichkeiten zur Ausbildung der Elementfugen (PDrei)

Als Fassadenbekleidungsmaterial für eine Warmfassade sind zu nennen:

Putz (s. auch 2.4.6):
Die Gestaltung der Fassade mit Putz ist grundsätzlich denkbar. Bei der Herstellung einer Putzfassade auf den GEDT-Elementen müssten allerdings mehrere Faktoren bedacht werden:

- Die Eignung der zu überputzenden Schicht als Putzträger muss geprüft werden, ggf. ist hier eine zusätzliche Putzträgerplatte zu montieren. Die auf der Außenseite (zzt. BFU) herausstehenden Metallteile müssen durch diese Trägerplatte überdeckt werden.
- Um zusätzliche Schichtenfolgen (und damit verbunden eine Erhöhung der Fassadendicke) zu vermeiden, müssten schon in der Entwurfsphase die Materialien und die Verbindungen auf den Putzeinsatz abgestimmt werden:
  Denkbar aber aufwändig ist das Versenken aller Verbindungsmittel in die zu überputzende Fläche. Im Idealfall ist diese als Putzträgerplatte zugelassen.

Blechfassade (ähnlich Stehfalz) auf Trennlage und Kerto:
Die zu bekleidende Oberfläche muss dabei frei von Durchdringungen und Unebenheiten sein. Gegebenenfalls wäre eine zusätzliche Platte aufzubringen, die die Ebenheit herstellt. Die Verblechung könnte im Werk vorgerichtet sein; Lediglich die Falze an den Elementstößen müssten nach der Montage geschlossen werden (Abbildung 8.2-4).
Der Elementstoß an sich würde bei dieser Lösung wie bei der jetzt ausgeführten Version mit einem vorkomprimierten Dichtband geschlossen werden (Abbildung 8.2-5).

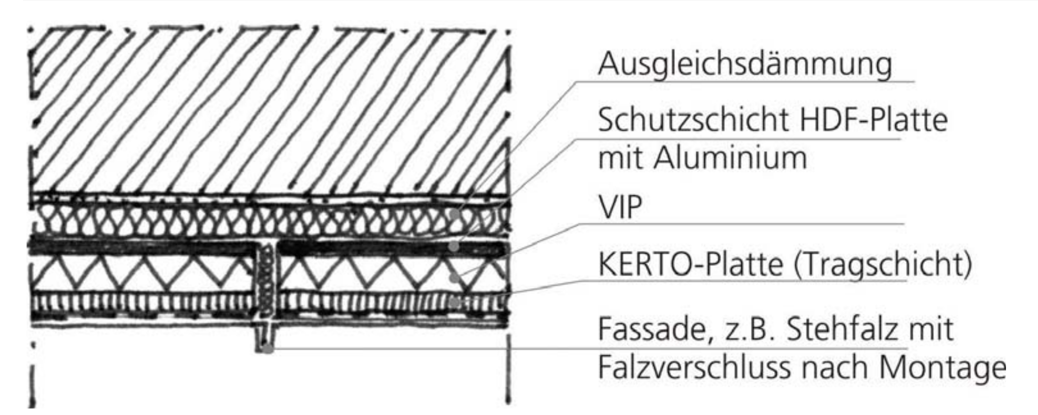


Abbildung 8.2-4: Skizze einer Fassade mit Blechbekleidung (PDrei)

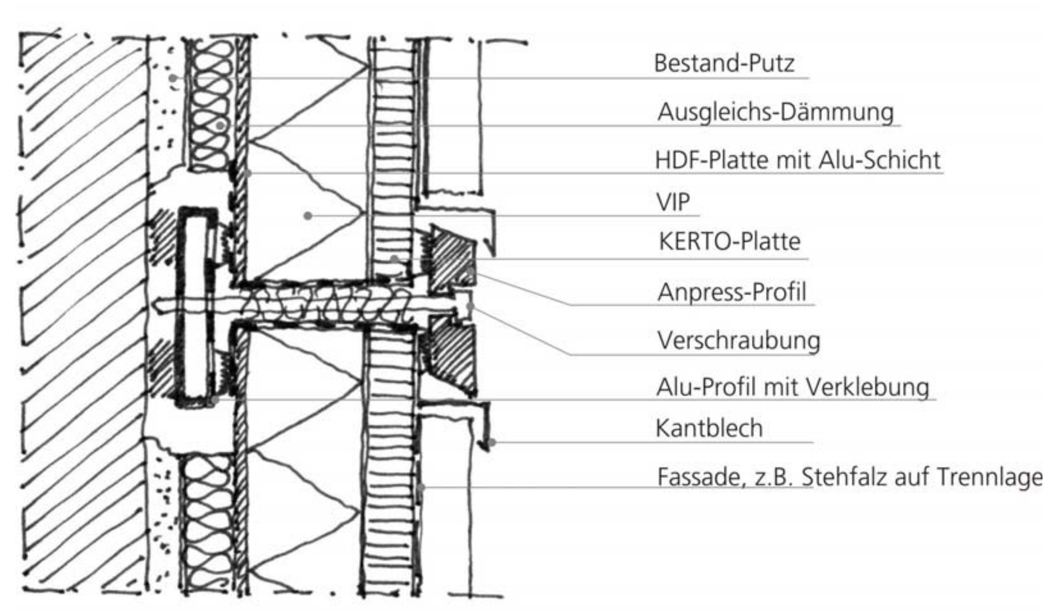


Abbildung 8.2-5: Detailschnitt der Blechbekleidung (PDrei)

Bei gleichzeitiger Verwendung der äußeren statisch-konstruktiv wirksamen Tragschicht als Fassadenbekleidung wären folgende Punkte zu beachten:

- Durchdringungen (z. B. durch Verbindungsmittel) sollten vermieden werden
- Material muss tragfähig und witterungsbeständig sein (z. B. Polycarbonat-Wabenplatten, Bencore o. ä., bzw. Stegplatten).
- Bei Verwendung einer nicht absolut witterungsbeständigen Außenschicht ist ein Dachüberstand ratsam
- Bei dampfdiffusionsdichten Bekleidungsmaterialien ist eine dampf-sperrende Schicht innenseitig im Bereich der VIP-Fugen anzubringen.

Darüber hinaus sind vielleicht auch völlig neue, „unkonventionelle“ Lösungen für die Außenbekleidung denkbar: Zurzeit werden am Fraunhofer-Institut für Bauphysik in Holzkirchen Möglichkeiten für eine neuartige Fassadengestaltung, nämlich der Einsatz von Textilien, untersucht (Ansprechpartnerin: Frau Alexandra Saur). Dieser Ansatz ist für die vorliegende Fragestellung von großem Interesse und zwar sowohl im Hinblick auf die geringe Schichtdicke und den geringen Materialeinsatz, als auch auf die erhoffte einfache Montage und Revisionierbarkeit: Es wird insbesondere eine Befestigung über Klettverschlüsse erwogen.

8.2.3 Fensterintegration

Im Zusammenhang mit dem GEDT-Konzept stellt sich die Frage, ob zukünftig eine vollständige Integration des Blendrahmens in die GEDT möglich ist. Diese Frage wurde auch in der Planungsphase im Projektteam, insbesondere durch PDrei und ift, untersucht. Am Ende wurde aus praktischen Erwägungen auf ein bewährtes Fenstersystem zurückgegriffen. Dadurch entfielen aufwändige Neuentwicklungen und die damit verbundenen Prüfungen zum Nachweis der Gebrauchstauglichkeit.

Eine direkte Integration der Blendrahmenkonstruktion in den Paneelaufbau könnte gleichwohl eine interessante Option darstellen. Ein entsprechender Vorschlag ist in der folgenden Abbildung 8.2-6 dargestellt

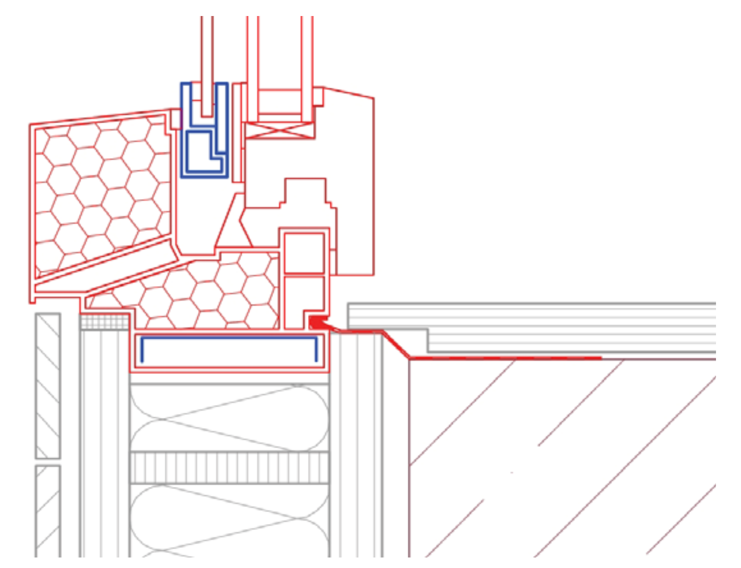


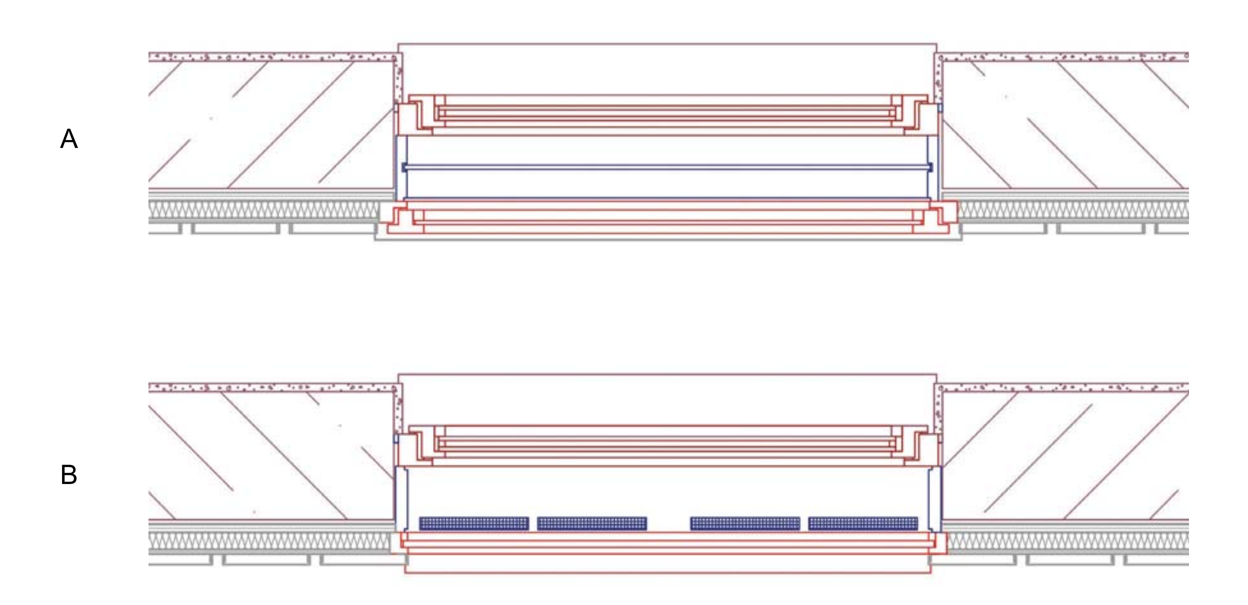
Abbildung 8.2-6: Beispiel eines Konzepts eines Systemrahmens zur Integration der Fenstertechnik in die GEDT (ift)

Vorteil bei der Integration ist, dass die Schnittstelle zum Paneel vereinheitlicht und das Fensterprofil auf die Anwendung abgestimmt ist.

Nachteilig bei der Lösung ist, dass ein vollständiges Fenstersystem zu entwerfen ist, welches hinsichtlich der Funktionseigenschaften und Werkstoffe nur eine eingeschränkte Flexibilität besitzt. Für eine wirtschaftliche Herstellung sind entsprechend hohe Stückzahlen bzw. die Beschränkung auf einfach zu bearbeitende Werkstoffe für den Blendrahmen erforderlich.

Ein direktes Anschlagen des Flügels am Dämmpaneel, also der Verzicht auf den Blendrahmen wäre denkbar, allerdings wären hier noch verschiedene konstruktive und herstellungsbedingte Probleme zu lösen.

Die bereits beschriebene Problematik, dass der Rahmen von hochwärmedämmenden Profilen üblicherweise dicker als der eigentliche Paneelaufbau ausfällt, wird auch in Zukunft nicht wesentlich zu verändern sein. Selbst wenn unterstellt wird, dass die Energieeffizienz von Dämmsystemen und Konstruktionen im Fensterrahmenbereich einen erheblichen Entwicklungssprung macht – wovon mit dem derzeitigen Stand der Technik bzw. Forschung nicht auszugehen ist –, würden sich die Fensterrahmendicken nur unwesentlich reduzieren lassen. Sollen durch weitere Entwicklungen die Gesamtstärken von Paneelaufbauten verringert werden, bietet sich eine Aufteilung der Fenstertechnik in zwei separate Konstruktionen an, entsprechend dem bewährten Kastenfensterprinzip.



	Beschreibung	Vorteile	Nachteile
A	• Außen ein Einfachflügel mit Einfachverglasung nach außen öffnend • Zwischenraum mit Zarge für Sonnenschutzein-richtung genutzt	• Raumseitig keine Belastungen durch Bautätigkeiten für den Nutzer • Äußeres Profil optisch in den Aufbau gut zu integrieren • Zusatzausstattungen integriert	• Verschmutzung des Zwischenraums • Tauwasserbildung im Zwischenraum nicht auszuschließen • Verschlechterung des Ψ-Werts durch zurückspringendes VIP • Nach außen öffnender Flügel nicht bei allen Bausituationen machbar + Bedienungsproblem
B	• Außen eine Festverglasung Zwischenraum durch Element in der Brüstung mit Lüftungsgerät ausgestattet	• Raumseitig keine Belastungen durch Bautätigkeiten für den Nutzer • Äußeres Profil optisch in den Aufbau optimal zu integrieren • Zusatzausstattungen integriert • Vorhandenes Fenster könnte beibehalten werden	• Verschmutzung des Zwischenraums • Tauwasserbildung im Zwischenraum nicht auszuschließen • Verschlechterung des Ψ-Werts durch zurückspringendes VIP speziell im Bereich der Lüftungseinrichtungen • Starker Eingriff in angestammtes Nutzerverhalten in Bezug auf geöffnete Fenster

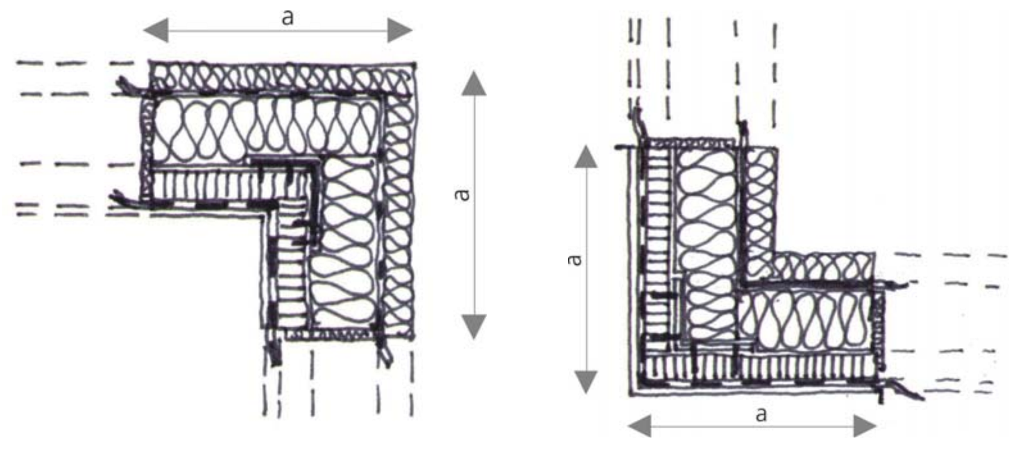
Abbildung 8.2-7: Kombination von Bestandfenstern mit zusätzlicher Verglasung in GEDT-Ebene (ift)

Die Vor- und Nachteile von derartigen Aufbauten und zwei mögliche Umsetzungen sind in Abbildung 8.2-7 zusammengestellt.

Weitere Einzelheiten zur Fensterintegration, insbesondere auch zur Verwendung verschiedener Fenstertypen im Rahmen des GEDT-Konzepts, sind in Anhang IV beschrieben.

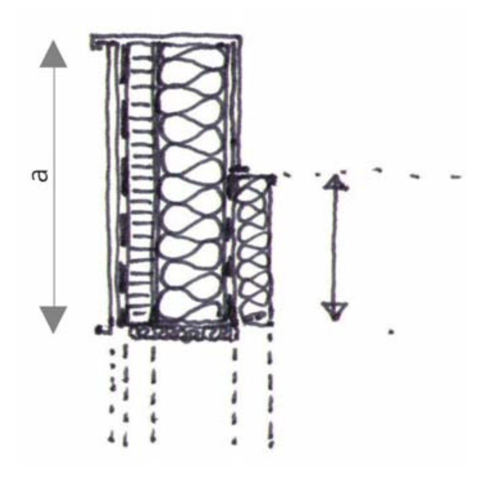
8.2.4 Universelle Lösungen für den Elementrand

Für einen universellen Einsatz der Großelement-Dämmtechnik sollten grundsätzlich vorgefertigte Anschlüsse existieren. Hier lassen sich die folgenden geometrischen Situationen benennen (Abbildung 8.2-8 und Abbildung 8.2-9):



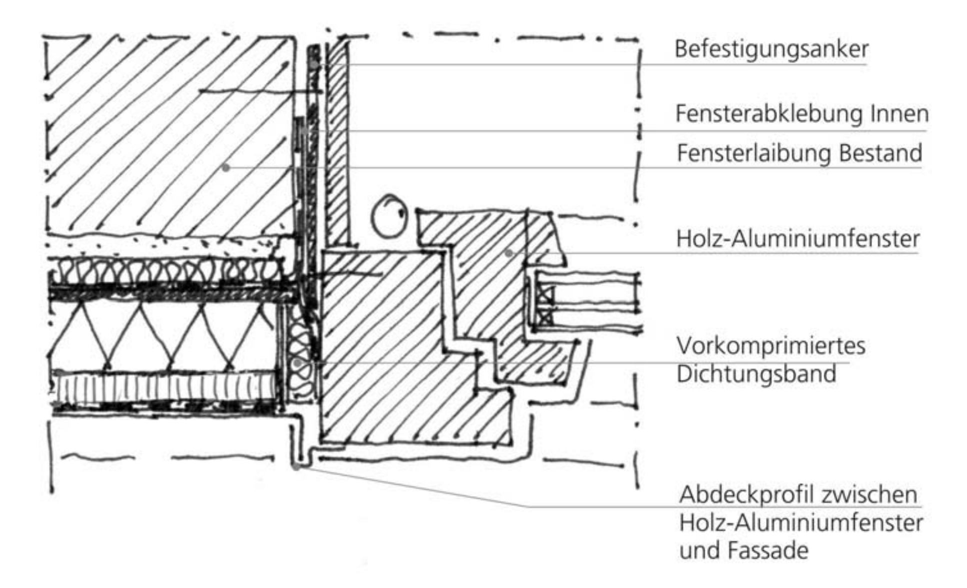
Innenecke (Prinzipskizze o.M.)

Außenecke (Prinzipskizze o.M.)

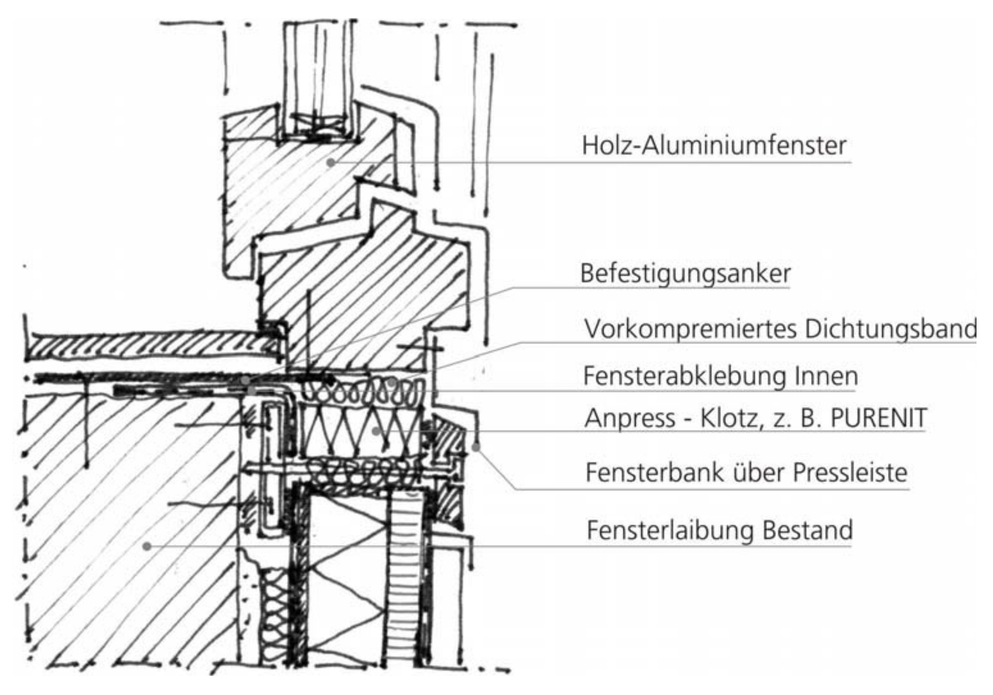


Endteil Fassadenabschluss
(Prinzipskizze o.M.)

Abbildung 8.2-8: Prinzipskizzen für universelle Bauteilanschlüsse der Fassade (PDrei)



Endteil Fensteranschluss – Seite
(Prinzipskizze o.M.)



Endteil Fensteranschluss – unten (Prinzipskizze o.M.)

Abbildung 8.2-9: Prinzipskizzen für universelle Bauteilanschlüsse an die Fenster (PDrei)

Diese Elemente (außer Fläche) sollten einheitliche Abmessungen haben, um ein beliebiges Kombinieren zuzulassen. Die Flächenelemente könnten dann an den jeweiligen Einsatz angepasst werden.
Die Befestigung an der Wand müsste mit wenigen universell eingesetzten Formteilen erfolgen (berechnet nach dem ungünstigsten Lastfall). Dies würde Kosten sparen und flexiblere Anwendungen erlauben.

8.2.5 Revisionierbarkeit

Im Fall der Fenster konnte die vollständige Revisionierbarkeit erreicht werden, d. h. auch eine Erneuerung des gesamten Fensters ist denkbar (vgl. Kap. 2.4.4.4).

Der Austausch eines fehlerhaften VIPs innerhalb eines GEDT-Elementes, ohne das gesamte GEDT-Element zu ersetzen, stieß wegen der schwierigen Zugänglichkeit des einzelnen VIP innerhalb eines GEDT-Elementes und der Überdeckung der VIPs durch BFU, Wetterschutzschale und deren Unterkonstruktion auf technisch kaum überwindbare Schwierigkeiten. Das Ziel einer „doppelten Elementierung“ (Großelement mit austauschbaren Kleinelementen (VIPs)) konnte im Sinne einer geschlossenen Systemlösung leider nicht realisiert werden. Denkbar wären im vorliegenden Konzept allenfalls noch punktuelle „chirurgische“ Eingriffe, bei denen eine teilweise Zerstörung der äußeren Schichten (Fassadenbekleidung, BFU) in Kauf genommen werden müsste.

Vor diesem Hintergrund erscheint es vielleicht auf den ersten Blick logischer, bei der vorgegebenen Elementierung anzusetzen, also gegebenenfalls das gesamte Großelement auszutauschen. Aber auch dies ist im vorliegenden Fall kaum zu realisieren: Weder könnte ein altes Element zerstörungsfrei ausgebaut, noch ein neues Element problemlos in die vorhandene Struktur integriert werden. Die Gründe sind hier vor allem in der Fixierung der W-Punkte mit Mörtel, im Montagekonzept (Einschweben der Elemente von oben, Ineinandergreifen der Elemente), sowie der elementübergreifenden Außenbekleidung zu sehen.

Eine Revisionierbarkeit einzelner VIPs würde also wesentliche Änderungen am System voraussetzen. Neben einem anderen Konzept für die wandseitigen Schalen (und weiterer Konsequenzen für die anderen wandseitigen Applikationspunkte) müsste insbesondere auch ein mehr oder weniger waagerechtes Einschweben der Elemente ermöglicht werden (z. B. eventuell Einfügen eines profilierten Stabes am Großelement in eine durch Federn gesicherte Schnappvorrichtung an der Althauswand).

Ob ein solches Vorgehen aber überhaupt bei Großelementen mit sinnvollem Aufwand durchführbar wäre, kann hier nicht beantwortet werden. Zu beachten ist jedenfalls, dass das Vorliegen nur weniger defekter Vakuum-Isolationspaneele sicher noch nicht den Austausch des gesamten Elements rechtfertigen würde. Insofern wäre es aus Sicht der Revisionierbarkeit möglicherweise günstiger, kleinere Elemente (mit einem oder wenigen VIPs) zu verwenden und gleichzeitig andere Montagekonzepte einzusetzen (s. dazu auch Abschnitt 8.2.6).

Vorrangig sollte man aber sicherlich ohnehin auf eine ausreichende Zuverlässigkeit der Vakuumpaneele setzen. Ein frühzeitiger Austausch würde vermutlich in jeder Konstruktion mit Aufwand verbunden sein, das Gleiche gilt für die kontinuierliche Überprüfung der Funktionsfähigkeit der Elemente. Wenn grundsätzlich sichergestellt werden kann, dass die überwiegende Zahl der VIPs ihre Funktionsfähigkeit über Jahrzehnte behält, kann ein punktueller Anstieg der Wärmeleitfähigkeit durch defekte Paneele wahrscheinlich toleriert werden, d. h. ein Austausch wäre dann nicht nötig.

8.2.6 Elementgröße und Installationssystem

Auch wenn die Anwendung von geschosshohen Großelementen mit einer Fläche von ca. 15 m² hier erfolgreich demonstriert werden konnte, stellt sich die Frage, ob sich durch eine andere – insbesondere geringere – Elementgröße Vorteile ergeben könnten. Die Grundidee einer Vorfertigung von Elementen, in die die empfindlichen Vakuum-Isolationspaneele eingehaust werden, um sie vor Beschädigungen auf der Baustelle zu schützen, ist sicherlich weiterhin richtig. Kleinere Elemente könnten aber insbesondere folgende Vorteile aufweisen:

- Es könnte eine einfachere, konventionelle Art der Installation (ohne Kran oder Gabelstapler sondern von Hand vom Gerüst aus) realisiert werden.
- Ein Rückgriff auf Standard-Elementgrößen statt individueller Elemententwicklung für jedes neue Gebäude wäre denkbar.
- Der Einsatz herkömmlicher Montagesysteme (z. B. Schienensysteme, Pfosten-/Riegel-Konstruktionen) wäre möglich.
- Ein Austausch einzelner Vakuum-Isolationspaneele wäre wahrscheinlich einfacher zu realisieren.

Natürlich kann eine Verkleinerung der Elementgröße auch Nachteile haben, zum Beispiel durch die größere Anzahl von Elementfugen und die sich dadurch ergebende erhöhte Wärmebrückenwirkung. Eine Fensterintegration wäre ebenfalls schwieriger zu erreichen.

Für eine grobe Abschätzung der veränderten Wärmebrückenwirkung wird unter Rückgriff auf die Ergebnisse von Abschnitt 2.6.4 die folgende Überlegung angestellt: Unter der Annahme, dass jedes der verkleinerten Elemente genau ein Vakuum-Isolationspaneel enthält, ergäbe sich unter Beibehaltung der in Hofheim verwendeten VIP-Größe die folgende Situation: Die Gesamt-Fugenlänge pro Fassade bliebe bestehen (137 m VIP/VIP- Fugen + 16,2 m GE/GE-Fugen = 153,2 m), allerdings würden alle VIP/VIP-Fugen nun ebenfalls zu Elementfugen werden. Natürlich spielt die Fugenbreite eine entscheidende Rolle. Hier können keine sicheren Voraussagen gemacht werden, es wird die Annahme getroffen, dass die Elementfugen der kleineren Elemente mit 8 mm etwas günstiger als die Planwerte für die Großelemente liegen. Der Wärmebrückenverlustkoeffizient pro m Fugenlänge ergäbe sich in diesem Fall zu WBV = 0,0056 W/mK, hochgerechnet auf einen qm Fassadenfläche betrüge der Wärmebrückenzuschlag auf den U-Wert ΔU = 0,015 W/m²K.

Unter der Annahme, dass bei den ursprünglichen Großelementen die Planwerte für die Fugenbreiten genau eingehalten werden (4 mm für die VIP-VIP-Fugen und 10 mm für die Elementfugen), ergeben sich hier Vergleichswerte von WBV = 0,004 W/mK für die VIP/VIP und WBV = 0,0066 W/mK für die GE/GE-Fugen, der Zuschlag auf den U-Wert beträgt ΔU = 0,011 W/m²K.

Es zeigt sich also, dass zwar unter den getroffenen Annahmen der Wärmebrückeneinfluss durch die Elementstöße leicht zunimmt; der Auswirkungen auf den U-Wert der gesamten Fassade sind allerdings nicht sehr groß. Wichtiger als die Fugen waren in den Großelementen die durch Metallanker verursachten Wärmebrücken zu bewerten (vgl. Kap. 2.6.6.3). Können diese reduziert werden, sind Verbesserungen beim Gesamt-U-Wert der Fassade zu erreichen.

Der Projektpartner IGRT hat sich bereits in der Vergangenheit mit Konzepten für kleinere Dämmelemente auseinandergesetzt. Eine grundsätzliche Gegenüberstellung von Großelement-Dämmtechnik (GEDT) und Komplettplatten (Mittelelement-Dämmtechnik, MEDT) erfolgte in [Reyer 2004d] (zunächst noch unter Verwendung herkömmlicher Dämmstoffe). Aufbauend auf diesen Erfahrungen werden von IGRT folgende Schlüsse für den Einsatz der Vakuumdämmung gezogen:

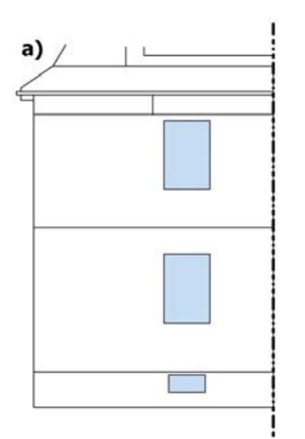
Aufgrund der gewonnenen Erkenntnisse bei der Verwendung von VIP als Hauptdämmschicht in der GEDT zeichnen sich hier ggf. wirtschaftliche Vorteile bei der Verwendung mittelformatiger Platten mit VIP - „Komplettplatten mit VIP“ – ab, weil sich möglicherweise Einsparungspotenziale durch Verzicht auf die innere Beplankung bei GEDT mit VIP realisieren lassen. Gegebenenfalls kann auch ganz oder teilweise auf die Durchbindungen von der Vorderseite zur Rückseite der GEDT-Elemente in Form der P-Punkte (PG, PHW, PW) verzichtet werden.
Die Einbindung von Vakuum-Isolationspaneelen in die Komplettplattentechnik wäre aber weiterzuentwickeln. Dabei könnte auch der Gedanke einer Verbindung mit konventionellem Dämmstoff – z. B. durch teilweises Einschäumen der VIPs – eine Rolle spielen.
Abbildung 8.2-10b zeigt ein Beispiel für die Anordnung derartiger Komplettplatten mit Vakuumdämmung („MEDT mit VIP“) mit zurückstehenden (nur) Horizontalschienen oder Horizontal- und Vertikalschienen (Prinzipskizze) – die Schienen ragen nur punktuell und mit geringer Tiefe (z. B. 5 mm) in die Fugen zwischen den (z. B. 40 mm–)VIPs mit mechanischem Anschluss der PG- und PW-Punkte an die Schienen.
Als besondere Kennzeichen der mittelformatigen Komplettplatten mit VIP im Vergleich zur GEDT mit VIP wären zu benennen:

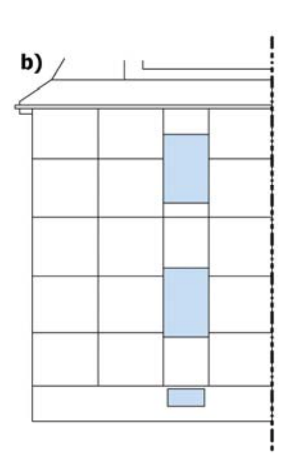
- Verwendung mittelformatiger vorgefertigter Elemente in teil-handwerklich orientierter Arbeitsweise
- Gegebenenfalls Einsparung der hinteren Schale mit ihren Befestigungspunkten an der Althauswand (Punkte E, W usw.)
- Applikation der Elemente über H+V-Schienen (mittels PG- und PW-Punkten an den Schienen), ggf. kombiniert mit Klebeapplikation und/oder in Kombination mit herkömmlichen Dämmstoffen (z. B. mit partiellem Einschäumen).

Darüber hinaus ist noch eine weitere Verkleinerung der Komplettplatten mit VIP denkbar, wir sprechen nun von „Kleinformatiger Dämmtechnik mit VIP in Direktapplikation“ - gem. Abbildung 8.2-10c[15]:
Auch hier zeigt eine Kombination von Komplettplattentechnik mit VIP technisch und wirtschaftlich relevante Ansätze – s. hierzu auch Abbildung 8.2-10c in der Gegenüberstellung zu den größeren mittelformatigen Platten in Abbildung 8.2-10b und den Großelementen in Abbildung 8.2-10a. Besondere Kennzeichen der kleineren Komplettplatten mit VIP nach Abbildung 8.2-10c im Vergleich zur GEDT mit VIP wären:

[15] Bezüglich einer umfassenden Gegenüberstellung von GEDT und Komplettplatten - zunächst noch bei Einsatz von konventionellem Dämmstoff – s. Beschreibung unter „Prognose“ und in [Reyer 2004d].

- Verwendung kleinerer, mittelformatiger, vorgefertigter Elemente in teil-handwerklich orientierter Arbeitsweise:
- Gegebenenfalls Einsparung der hinteren Schale bei direkter Klebeapplikation – ggf. mit zusätzlichen H-Schienen
- „Kleinere“ Komplettplatten mit tragfähigen VIPs (MEDT-VIP) in Direktapplikation wären jedoch erst noch zu entwickeln





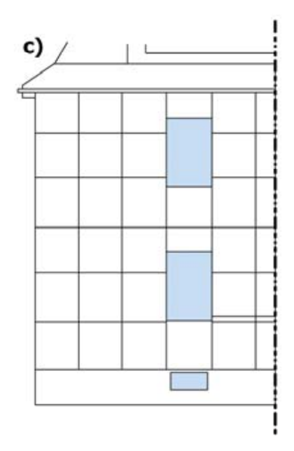


Abbildung 8.2-10: GEDT–VIP-Fassaden in Hofheim - Bild a) - und Gegenüberstellung der Fassade als Studie mit relativ großen mittelformatigen VIP-Komplettplatten auf Schienen – Bild b) – und kleinen mittelformatigen VIP-Komplettplatten in Direktapplikation, vgl. Bild c) (IGRT)

Durch PDrei wurde ein Vorschlag für eine Pfosten-Riegel-Konstruktion erarbeitet (Abbildung 8.2-11), bei dem gleichzeitig auch auf die innere Elementbeplankung (Kerto-Seite) verzichtet werden kann (vgl. Kap. 8.2.1):
Die einzelnen Fassadenelemente besitzen die Größe eines VIPs (ca. 75 x 250 cm bzw. 2 m²). Die Vertikallasten werden über Konsolen im Sockelbereich, die Horizontalkräfte über eine horizontale „Riegel-Konstruktion“ in den Bestand eingeleitet. Die Weiterleitung der Vertikallasten über mehrere Elemente wird über die äußere Tragschale vollzogen.

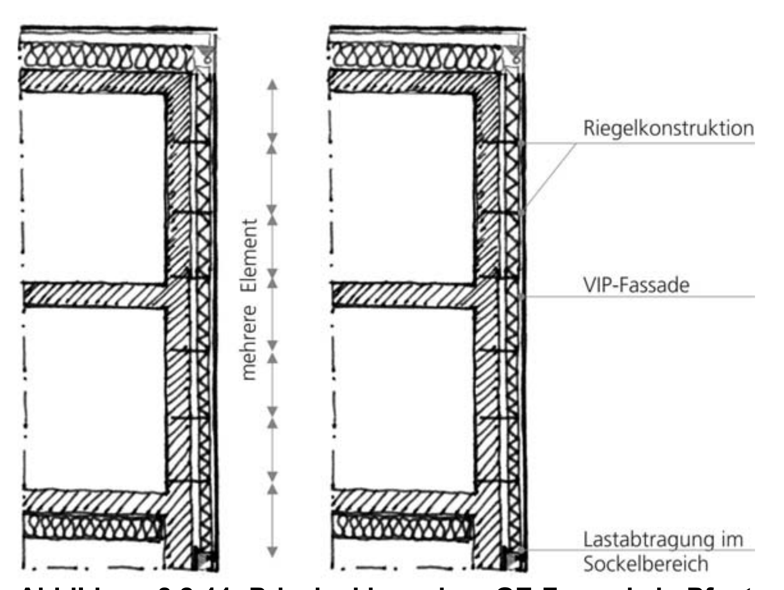


Abbildung 8.2-11: Prinzipskizze einer GE-Fassade in Pfosten-Riegel-Konstruktion (PDrei)

Die Unterschiede im Montageablauf für die unterschiedlichen Elementkonzepte sind in der folgenden Tabelle 8.2-1 zusammengestellt:

Tabelle 8.2-1: Gegenüberstellung des Montageablaufs bei verschiedenen Konstruktionskonzepten der Fassaden

Konstruktionstechnik	GEDT	Pfosten-Riegel	MEDT
Einrüstungstermin	ggf. nicht erforderlich		
Vermessung Fassade		nicht erforderlich	nicht erforderlich
Unterkonstruktion	Hubbühne	Gerüst erforderlich	Gerüst erforderlich
Montage	Kran/Stapler (Größe lässt Montage nur mit Hebegerät zu)	Gerüst erforderlich	Gerüst erforderlich
Fassade	Hubbühne	Gerüst erforderlich	Gerüst erforderlich
Fazit	unterschiedliche Arbeitsanforderungen machen unterschiedliche Hifsmittel notwendig (Kran - Hubbühne)	Gerüst kann während der gesamten Bauzeit an der Fassade stehen bleiben - Gerüstbefestigung ist mit der Pfosten-Riegel-Stellung zu koordinieren	Gerüst kann während der gesamten Bauzeit an der Fassade stehen bleiben - Gerüstbefestigung ist in den Element-Fugen zu berücksichtigen

8.3 Fazit

Der Einsatz von Vakuumdämmung in der Bestandssanierung bietet bei Anwendungen, bei denen für konventionelle Dämmmaterialien nicht ausreichend Platz zur Verfügung steht, interessante Perspektiven. Um den empfindlichen Dämmstoff möglichst gut zu schützen und gleichzeitig eine neue Art der Fassadensanierung mit großen Bauteilen inklusive Fensterintegration zu erproben, wurde für die Gebäude in Hofheim die Großelement-Dämmtechnik mit Vakuumdämmung entwickelt und angewendet.

Die mit dem Projekt verbundenen Ziele konnten im Wesentlichen erreicht werden. Die Realisierbarkeit des neuen Dämmsystems wurde erfolgreich demonstriert. Im Laufe von Entwicklung und Umsetzung wurden jedoch auch zahlreiche Erkenntnisse erzielt, die, aufbauend auf dem umgesetzten Konzept oder den im letzten Kapitel beschriebenen Ansätzen, in die Weiterentwicklung hin zu einem marktfähigen Produkt einfließen sollten. Ergebnis dieser Entwicklungen müssten neben Optimierungen bei Elementaufbau und -abmessung vor allem eine Reduktion der Kosten und des Herstellungs-Energieaufwandes sein.

Die Herstellung und Anwendung einer Gebäudedämmtechnik mit vorgefertigten Elementen unter Verwendung von Vakuumpaneelen wird auch mittelfristig noch ein hohes technisches Know-how und innovative Entwicklungen erfordern. Nicht zuletzt angesichts der Herausforderungen des Klimaschutzes wird es aber notwendig sein, auch in der Gebäude-Energiespartechnik weiterhin neue und auch unkonventionelle Wege zu erproben.

Literatur

[Abet 1999]	Abet Infotec, May 1999 Special edition – R 605, Life Cycle Assessment for an European HPL, (aus dem Internet, www.abetlaminati.com, Juli 2007)
[Annex 2005]	Vacuum Insulation in the Building Sector, IEA/ECBCS Annex 39 Endbericht, 2005
[BFE 2003]	Ökobilanz eines Vakuum-Isolations-Paneels (VIP). Ausgearbeitet durch Institut für Energie, FHBB, Muttenz; ESU-Services, Uster; Bundesamt für Energie, Schweiz, Dezember 2003
[Cremers 2006]	Cremers, J.: Vakuum-Dämmsysteme, Deutsches Architektenblatt 11/2006, S.65-68
[Diefenbach 2006]	Diefenbach, N.; Großklos, M.: Modernisierung von Zweifamilienhäusern auf unterschiedliche energetische Standards unter Einsatz von Großelementen mit Vakuumdämmung, 10. Passivhaustagung in Hannover Mai 2006
[DIN 4109]	DIN 4109, Schallschutz im Hochbau, DIN 4109: Anforderungen und Nachweise Beiblatt 1 zu DIN 4109: Ausführungsbeispiele und Rechenverfahren November 1989 Beiblatt 1/A1 zu DIN 4109: Ausführungsbeispiele und Rechenverfahren, Änderung A1, September 2003
[FIW 2005]	Forschungsinstitut für Wärmeschutz e. V., München: Prüfbericht Nr. F.2-1012/05 für 40 mm Vakuumelement der Firma Variotec vom 21.10.2005
[Gellert 2005]	Gellert, R.; Albrecht, W.; Sprengard, C.: „Einflussfaktoren auf die physikalischen Eigenschaften von VIPs: vom Labormesswert zum anwendungsbezogenen Bemessungswert“, 2. VIP-Bau-Fachtagung, 16./17.5.2005 in Wismar
[Gösele 1993]	Gösele, K..: INFORMATIONSDIENST HOLZ, holzbau handbuch, R3/T3/F3, Schallschutz bei Holzbalkendecken, Hrsg. Entwicklungsgemeinschaft Holzbau, München 1993
[Gropp 2007]	Markus Gropp, Lebenszyklusanalyse der Großelement-Dämmtechnik mit Vakuumpaneel, Diplomarbeit an der Technischen Hochschule Darmstadt, Institut WAR, Fachgebiet Industrielle Stoffkreisläufe, Darmstadt, Juni 2007
[Großklos 2006]	Großklos, M., Weber, C.: Einsatz von Vakuumdämmung im Gebäudebereich: Erfahrungen und Perspektiven Schriftfassung zum Vortrag auf dem 2. Baustelleninfotag am 10.11.2006 „Zukunft Gebäudebestand“ der Hofheimer Wohnungsbau GmbH zur vorbildlichen energetischen Sanierung dreier Mehrfamilienhäuser in der Wilhelmstraße 35-39 in Hofheim; Download: http//:www.ihre-zukunft-in-hofheim.de/projekte/wilhelmstr/index.htm
[IFU 2001]	Institut für Umweltinformatik Hamburg (ifu), Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg (ifeu): Umberto – Software für das betriebliche Stoffstrommanagement, Benutzerhandbuch Version 4.0, 2001
[illbruck]	Produktdatenblatt der Firma Illbruck für das Fugendichtungsband illbruck 600

[ISO 140] DIN EN ISO 140
Messung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen
Teil 4 : Messung der Luftschalldämmung zwischen Räumen in Gebäuden, Dezember 1998
Teil 5 : Messung der Luftschalldämmung von Fassadenelementen und Fassaden in Gebäuden, Dezember 1998

[ISO 717] DIN EN ISO 717
Bewertung der Schalldämmung in Gebäuden und von Bauteilen,
Teil 1 Luftschalldämmung, November 2006

[PDrei 2006] PlanungsgruppeDREI, Energetische Sanierung und Modernisierung Wilhelmstraße 35- 37 in Hofheim am Taunus, Zwischenbericht, 2006

[Porextherm] Produkt-Datenblatt für Vacupor NT, Version 1.0.3 / 12-07-05 /GE, Fa. Porextherm, Kempten

[Reuther 2006] Reuther, S., Diefenbach, N.
Energiesparhaus-Standard und neuartige Fassadenelemente: Innovative Modernisierung von drei kleinen Mehrfamilienhäusern in Hofheim
2. Baustelleninfotag am 10.11.2006 „Zukunft Gebäudebestand" der Hofheimer Wohnungsbau GmbH zur vorbildlichen energetischen Sanierung dreier Mehrfamilienhäuser in der Wilhelmstraße 35-39 in Hofheim; Download:
http//:www.ihre-zukunft-in-hofheim.de/projekte/ wilhelmstr/index.htm

[Reyer 2004a] Reyer, E., Sieder, M., Bamberger C., Schild, K., Völkner, S.:
Großelement-Dämmtechnik (GEDT) zur energetischen Fassadensanierung; BAUTECHNIK 81 (2004) H.3, S.189-200

[Reyer 2004b] Reyer, E., Scherer, M., Bamberger C., Juretzko, M., Schild, K., Sieder, M., Völkner S.:
Energiegerechte Außenwandsanierung mit industriellen Vorfertigungstechniken. Forschungs- und Entwicklungsvorhaben, Ruhr-Universität Bochum, Institut für konstruktiven Ingenieurbau. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, 2004 (Heft 32 der Schriftreihe Prof. E. Reyer) S.1 bis 398

[Reyer 2004c] Reyer E., Bamberger, C. (Hrsg.):
Energiegerechte Außenwandsanierung mit industriellen Vorfertigungstechniken (GEDT), Ergebnisse – Abschlussbericht 2004/2005
Reyer, E., Scherer, M., Bamberger C., Juretzko, M., Schild, K., Sieder, M., Völkner S., Ruhr-Universität Bochum, Institut für konstruktiven Ingenieurbau, 2004/2005

[Reyer 2004d] Reyer, E., Sieder, M., Bamberger, C.:
Innovative Fassaden-Sanierungstechniken mit vorgefertigten Dämmelementen, Großelement-Dämmtechnik (GEDT) und Komplettplatten-Technik; BAUZENTRUM/BAUKULTUR (2004), H.4. S.24-35, Verlag DAS BEISPIEL GmbH, Darmstadt

[Reyer 2006] Reyer, E., Kröger, R., Bamberger, C.:
Entwicklung einer Großelement-Dämmtechnik mit Vakuum-Isolations-Paneelen (GEDT-VIP) in Statik und Konstruktion für anwendungspraktische Realisierungen; 2. Baustelleninfotag am 10.11.2006 „Zukunft Gebäudebestand" der Hofheimer Wohnungsbau GmbH zur vorbildlichen energetischen Sanierung dreier Mehrfamilienhäuser in der Wilhelmstraße 35-39 in Hofheim; Download:
http//:www.ihre-zukunft-in-hofheim.de/projekte/ wilhelmstr/index.htm

[Reyer 2007a] Reyer E., Kröger R., Bamberger, C.:
Entwicklung einer Großelement-Dämmtechnik (GEDT) mit Vakuum-Isolationspaneelen (VIP) mit Realisierung am Beispiel dreier Wohnhäuser)
TEIL I: Entwicklung und Technik, BAUTECHNIK 84 (2007) H.5, S.335-344

[Reyer 2007b] Reyer E., Kröger R., Bamberger, C.:
Entwicklung einer Großelement-Dämmtechnik (GEDT) mit Vakuum-Isolationspaneelen (VIP) mit Realisierung am Beispiel dreier Wohnhäuser)
TEIL II: Praktische Anwendung, BAUTECHNIK 84 (2007) H.6, S.409-416

[Reyer 2008] Reyer, E., Bamberger, C., Sieder, M. unter Mitwirkung von Kahrobai, A., Iranmanesch, B:
Entwicklung einer Fassadendämm- und Sanierungstechnik mit vorgefertigten Komplettplatten; Institut für konstruktiven Ingenieurbau. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart, in Vorbereitung, erscheint voraussichtlich 01/2008 (Heft 30 der Schriftreihe Prof. E. Reyer)

[Sieder 2004] Sieder, M., Reyer, E.:
Zum Trag- und Verformungsverhalten großformatiger geschosshoher Sanierungs-Dämmelemente unter statischer Mitwirkung der außenseitigen Putzschicht; BAUPHYSIK 26 (2004) H.1, S.14-24

[va-q-tec] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung von „va-q-vip B“ (Zulassungsnummer Z-23.11-1658), Firma va-q-tec, Würzburg

[Willems 2005] Willems, Schild, Hellinger: Numerical Investigation on Thermal Bridge Effects in Vacuum Isolation Elements, 7th International Vacuum Insulation Symposium, September 28-29. 2005, Dübendorf, Schweiz

Übersicht über die Anhänge

Weitere Detailinformationen zum Projekt sind in Anhängen zusammengestellt. Diese können in Form einer CD-ROM beim IWU bezogen werden.

Anhang I: Konstruktionszeichnungen (PDrei)

Anhang II: Statik und Konstruktion – GEDT mit VIP (IGRT)

Anhang III: Details zur Berechung der energetischen Kennwerte der GEDT (IWU)

Anhang IV: Details zur Fensterintegration und Schallmessung (ift)

Anhang V: Messstand zur Funktionsprüfung der GEDT (PDrei, IGRT, IWU)

Anhang VI: Montageanleitung GEDT (PDrei)